



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS
2017/2018

Estudio conceptual de una suspensión activa para rodaduras monoeje de alta velocidad

Autor: José María Estella Pozo

Director: Juan Manuel Ramírez Bueno

05/07/2018



AGRADECIMIENTOS

Primeramente quisiera agradecer a todo el personal y equipo docente de la Universidad Pontificia de Comillas por sus servicios y por la formación recibida durante el tiempo de estudio.

Reconocimiento especial para mi familia, que me ha dado toda la ayuda necesaria sin que jamás me faltara de nada y ha estado siempre ahí para apoyar mis decisiones.

A mis compañeros del departamento de I+D de Talgo, especialmente a mi tutor Juan Manuel y a Gabriel por compartir conmigo su experiencia y tiempo.

A mis compañeros de la universidad, algunos de ellos ya convertidos en amigos, que han sido un pilar fundamental a lo largo de mi formación. Mención especial al grupo de ingenieros altos, que han estado siempre ahí desde el principio.

A mis amigos, por todos esos buenos ratos que hemos pasado juntos y los que quedan por llegar.

Gracias de todo corazón.

FICHA TÉCNICA

Autor: José María Estella Pozo

Director: Juan Manuel Ramírez Bueno

Programa: Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, Curso 2017-2018

Título: Estudio conceptual de una suspensión activa para rodaduras mono eje de alta velocidad

RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster surge del proyecto europeo PIVOT. El primer objetivo de esta iniciativa es incrementar el confort, aunque también se busca mejorar las prestaciones, coste de ciclo de vida, impacto sobre la vía del material rodante en múltiples ámbitos. En concreto, este TFM se ha centrado en la suspensión ferroviaria en su etapa primaria. PIVOT es parte de la iniciativa europea Shift2Rail, cuyo objetivo es fomentar el uso del ferrocarril, mejorar las congestiones, seguridad y uso de energía entre otros aspectos.

Inicialmente se ha hecho una descripción general de cómo funcionan los sistemas de suspensión que existen hoy día tanto en la etapa primaria como secundaria y de las tecnologías que tradicionalmente conforman estos sistemas de amortiguación.

Seguidamente se ha esbozado hacia dónde tienden las nuevas tecnologías cuando se trata el tema de la suspensión inteligente. Pueden diferenciarse claramente dos tipos de tecnología. La suspensión activa, que almacena, disipa e introduce energía al sistema de manera variable y la suspensión semi-activa, caracterizada por poder variar su coeficiente de amortiguamiento para adaptarse a la situación óptima. Otro punto clave en el panorama de las suspensiones inteligentes consiste en la estrategia de control de las mismas. Se ha hecho una breve descripción de los múltiples sistemas de regulación que existen hoy día.

Conociendo las naturalezas de las cargas, los tipos de vibraciones a amortiguar y las tecnologías existentes se ha realizado un estudio de lo que existe en el mercado o “Benchmark” para ver qué fabricantes poseen tecnología aplicable.

Además de las marcas dedicadas al sector ferroviario también se han buscado tecnologías en otros sectores como minería, defensa o automoción.

Como conclusión puede considerarse que en función del nivel de tecnología actual, el nivel de desarrollo que poseen los fabricantes y la naturaleza de las cargas a amortiguar, la inclusión de una amortiguación semi-activa en la etapa primaria puede ser lo más adecuado a la hora de mitigar vibraciones y mejorar el confort del ferrocarril actual.

Palabras clave: Vehículo ferroviario, control de vibraciones, suspensión activa, suspensión semi-activa, suspensión primaria, confort.

ÍNDICE

1	Introducción.....	- 1 -
1.1	Generalidades	- 1 -
1.2	Objetivo de estudio.....	- 2 -
1.3	Alcance del proyecto.....	- 2 -
2	Tareas y planificación	- 3 -
3	Aspectos generales.....	- 5 -
3.1	Sistemas de suspensión	- 5 -
3.1.1	Suspensión Primaria.....	- 5 -
3.1.2	Suspensión secundaria.....	- 7 -
3.1.3	Elementos en la suspensión.....	- 8 -
3.2	Suspensión pasiva / tradicional	- 11 -
4	Estado del arte.....	- 13 -
4.1	Suspensión activa	- 16 -
4.2	Suspensión semi-activa	- 16 -
4.3	Principales diferencias entre amortiguación activa Vs. Semi-activa.....	- 17 -
4.4	Tipos de actuadores para suspensiones activa y semi-activa	- 18 -
4.4.1	Actuadores para suspensión activa.....	- 18 -
4.4.2	Actuadores para suspensión semi-activa.....	- 20 -
4.5	Estrategias de control para sistemas activos y semi-activos	- 21 -
4.5.1	Control proporcional, integral y derivativo (PID).....	- 21 -
4.5.2	El control SKYHOOK	- 22 -
4.5.3	El control en función de la frecuencia de actuación (Control mecánico FSD)-	24 -
4.5.4	El Control H^∞	- 24 -
4.5.5	El control óptimo LQ/LQG	- 25 -
4.5.6	Otros métodos de control	- 26 -
5	Definición de requerimientos	- 29 -
5.1	Seguridad y fiabilidad	- 30 -

5.2	Dinámica de caja y vibraciones.....	- 31 -
5.3	Métodos de evaluación del confort	- 34 -
5.4	Métodos para reducir vibraciones en caja	- 36 -
5.4.1	Actuación en suspensión primaria.....	- 36 -
5.4.2	Actuación en suspensión secundaria	- 37 -
5.4.3	Criterios de diseño para la caja.....	- 37 -
5.4.4	Otros métodos	- 38 -
5.5	Suspensión activa y semi-activa para mejorar estabilidad y guiado	- 39 -
5.6	Suspensión activa y semi-activa para mejorar el confort	- 40 -
6	Conclusión y selección preliminar de tecnología.....	- 41 -
6.1	Tecnologías activa y semi-activa en el mercado	- 45 -
6.1.1	Proveedores sector ferroviario.....	- 45 -
6.1.2	Candidatos sector defensa	- 48 -
6.1.3	Candidatos sector minería	- 49 -
6.1.4	Candidatos sector automoción.....	- 49 -
7	Aportaciones	- 55 -
8	Trabajos futuros.....	- 57 -
9	Bibliografía	- 59 -

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1: Esquema de suspensión primaria.....	- 6 -
Figura 2.2: Esquema suspensión primaria moderna.....	- 6 -
Figura 2.3: Montaje de balona neumática en suspensión secundaria.....	- 7 -
Figura 2.4: Muelle helicoidal	- 9 -
Figura 2.5: Resorte caucho-metal.....	- 9 -
Figura 2.6: Balona neumática ferroviaria.....	- 9 -
Figura 2.7: Suspensión de ballesta	- 10 -
Figura 2.8: Amortiguador ferroviario.....	- 11 -
Figura 2.9: Esquema de barra de torsión.....	- 11 -
Figura 2.10: Representación esquemática de una suspensión pasiva.....	- 12 -
Figura 3.1: Serie E500 Shinkansen	- 14 -
Figura 3.2: Serie E6 Shinkansen	- 14 -
Figura 3.3: Esquema de sistemas de amortiguador pasivo, activo y semi-activo	- 17 -
Figura 3.4: Esquema actuador electromecánico.....	- 18 -
Figura 3.5: Esquema actuador electrohidráulico.....	- 19 -
Figura 3.6: Esquema amortiguador magnetoreológico	- 20 -
Figura 3.7: Esquema de funcionamiento de un controlador PID	- 21 -
Figura 3.8: Esquema de amortiguador convencional (a) Vs. aproximación <i>Skyhook</i> (b)	- 22 -
Figura 3.9: Transmisibilidad de sistema de suspensión pasivo.....	- 23 -
Figura 3.10: Transmisibilidad de sistema <i>Skyhook</i>	- 23 -
Figura 3.11: Baipaseado para modificación de fuerza de amortiguamiento en función de frecuencia.....	- 24 -
Figura 3.12: Esquema control H_∞	- 25 -
Figura 4.1: Ejes de actuación de las fuerzas y sus movimientos relacionados.....	- 31 -
Figura 4.2: Balanceo de un vehículo ferroviario.....	- 32 -
Figura 4.3: Cabeceo de un vehículo ferroviario	- 32 -
Figura 4.4: Movimiento de lazo de un vehículo ferroviario.....	- 32 -

Figura 4.5: Vaivén de un vehículo ferroviario	- 32 -
Figura 4.6: Serpenteo de un vehículo ferroviario.....	- 33 -
Figura 4.7: Sacudida de un vehículo ferroviario	- 33 -
Figura 4.8: Representación de algunos modos de vibración por deformación de caja	- 34 -
Figura 4.9: El principio de separación de masas aumenta la frecuencia natural de caja.....	- 38 -
Figura 4.10: Montaje de actuadores piezoeléctricos para amortiguar vibraciones.....	- 39 -
Figura 5.1: Esquema de funcionamiento de amortiguador semi-activo	- 42 -
Figura 5.2: Comportamientos de amortiguador semi-activo Vs. Pasivo.....	- 43 -
Figura 5.3: Rangos de variación de fuerza de amortiguado en suspensión semi-activa	- 43 -
Figura 5.4: Reducción de vibraciones con distintos tipos de control en bogie trasero.....	- 44 -
Figura 5.5: Reducción de vibraciones con distintos tipos de control en suelo de caja.....	- 44 -
Tabla 4.1: Medición de confort según aceleraciones	- 35 -
Tabla 4.2 Medición de confort según índice <i>NMV</i>	- 35 -
Tabla 5.1: Principales comparativas suspensión activa Vs. Semi-activa	- 45 -

1 Introducción

1.1 Generalidades

La tendencia actual en general en el sector ferroviario es aumentar la velocidad. No obstante, mayores velocidades implican generalmente mayores fuerzas y aceleraciones, lo cual tiene un impacto negativo tanto en la estructura como en el confort o incluso en el coste de mantenimiento. Asimismo, para conseguir un vehículo de altas capacidades es necesario reducir peso de caja. Esto tiene un impacto directo en la rigidez de las estructuras, lo que provoca frecuencias naturales más bajas y por ende, aumenta el riesgo de vibraciones resonantes que afectan a todo el conjunto del tren y al confort.

PIVOT es un proyecto que se centra en el desarrollo de múltiples subsistemas claves del material rodante para alcanzar los principales objetivos del programa Shift2Rail. S2R es una iniciativa europea más global que se centra en el sistema de transporte ferroviario en general, mejorando aspectos como la fiabilidad, la capacidad, costes y rendimientos.

Existen cinco áreas de actuación en el proyecto PIVOT:

- Caja
- Rodadura (Bogies o Rodales)
- Frenos
- Puertas
- Interiores modulares

Estos campos de desarrollo están a su vez divididos en paquetes de trabajo (o “Work Packages”). El presente trabajo se centra en el área de rodadura, a la cual se le han asignado los paquetes 3 y 4 (WP3 y WP4). Dentro de estos campos de actuación, se trabajará dentro del WP3. Los nuevos conceptos a introducir son los siguientes:

- Nuevas técnicas de mantenimiento predictivo basadas en métodos avanzados de adquisición de datos.
- Nuevos tipos de guiado activo para los diferentes tipos de material rodante.
- Desarrollo de un sistema activo de control de altura para adaptarse a los andenes.
- Uso de nuevos tipos de suspensión.

La principal meta es desarrollar y combinar tecnologías para producir material rodante confortable, ligero, silencioso, fiable, con un bajo impacto con la vía y con un coste de ciclo de vida (LCC) lo menor posible. El presente proyecto se centra en uno de los principales puntos de actuación del WP3, el uso de nuevos tipos de suspensión “inteligentes” para un adecuado

comportamiento de los elementos. Así se conseguiría una reducción de las principales fuerzas y aceleraciones causantes de degradación mejorando el mantenimiento. También se mejorará el comportamiento dinámico del vehículo, aumentando así la capacidad de la línea (aumentando la velocidad operativa) y el confort del pasajero.

1.2 Objetivo de estudio

El objetivo de este trabajo de fin de máster es estudiar y analizar diferentes tipos de sistemas de suspensión en función de las diversas sollicitaciones. Existen diferentes aproximaciones para reducir las vibraciones. Se puede aumentar la rigidez de la caja y/o se pueden mejorar los sistemas de amortiguación. Cuando los sistemas convencionales de mitigación ya no tienen margen de mejora, las tecnologías activas y semi-activas pueden ser una solución a explorar.

En el mercado existen múltiples tecnologías para usos específicos dentro de los distintos sectores. En el presente trabajo se buscarán diferentes productos en un espectro que abarque más sectores además del ferroviario con el fin de encontrar soluciones aplicables al mismo. Como se prevé que en el futuro aumenten las velocidades de marcha, buscar métodos para mejorar el comportamiento de los sistemas y el confort es esencial. No solo desde el punto de vista dinámico sino también desde el punto de vista de la comodidad. Por ello, hay que tratar de mitigar cualquier acción de las vibraciones a lo largo de todo el conjunto. En concreto, este trabajo trata de buscar sistemas que permitan reducir aceleraciones verticales en la etapa primaria del amortiguador para minimizar desde el inicio la transmisión de vibraciones verticales a la caja.

1.3 Alcance del proyecto

El trabajo versará acerca de la búsqueda o Benchmark de diferentes sistemas de amortiguación activa y semi-activa para la reducción de vibraciones en sentido vertical en la suspensión primaria en función de los requerimientos del tren con el fin de aumentar el confort del pasajero. Una vez se hayan visto los sistemas disponibles actualmente en el mercado se trataría de definir cuál es la mejor opción para un caso de estudio.

La suspensión secundaria, es decir, la más cercana al pasajero se diseña para que transmita vibraciones de entorno a 1Hz ya que esa es la frecuencia natural a la que el ser humano anda y permite que no haya mareos.

La suspensión primaria, que es donde se va a actuar, tiene que reducir las vibraciones de manera que filtre aquellas vibraciones relativas a los modos propios de la caja (8-15 Hz) y que filtre también rangos que creen disconfort al pasajero (4-10 Hz)

2 Tareas y planificación

A continuación se numerarán las principales tareas a realizar y el tiempo invertido para cada una de ellas. Se contabilizarán los días, a los cuales se les asigna una jornada laboral de 8 horas.

- Introducción y resumen (**1 día**)
- Objetivos del trabajo (**3 días**)
- Aspectos generales y estado del arte (**15 días**)
 - Suspensión activa (2 días)
 - Suspensión semi-activa (2 días)
 - Diferencias y ventajas/desventajas de cada sistema (1 día)
 - Actuadores para los sistemas de suspensión (4 días)
 - Estrategia de control (6 días)
- Definición de requerimientos (**10 días**)
 - Seguridad y fiabilidad (2 días)
 - Evaluación del confort (2 días)
 - Dinámica de caja y vibraciones (3 días)
 - Métodos para reducir vibraciones (3 días)
- Conclusión y selección preliminar de tecnología (**4 días**)
- Trabajos futuros (**1 día**)
- Redacción/Corrección del TFM (**12 días**)

Total: 49 días.

Firma director: Juan Manuel Ramírez Bueno



Firma alumno: José María Estella Pozo



3 Aspectos generales

3.1 Sistemas de suspensión

El sistema de suspensión de un vehículo es el elemento encargado de soportar el peso del vehículo y permitir su movimiento elástico de manera controlada sobre sus ejes así como absorber la energía producida por las irregularidades de la vía. El objetivo principal de la suspensión puede dividirse en dos categorías principales. La primera es garantizar la estabilidad y el guiado del vehículo de manera que se obtenga una circulación dentro de los márgenes de seguridad con unos niveles aceptables de fatiga tanto en vía como en el vehículo. La estabilidad debe estar asegurada independientemente de las irregularidades, desniveles, radios de curva o de la pendiente. La segunda categoría tiene que ver con el confort del pasajero para mantener unos niveles adecuados. La comodidad de los pasajeros y la protección de las mercancías transportadas se consiguen reduciendo los movimientos verticales, longitudinales, transversales y de lazo.

Los sistemas de suspensión convencionales, como se verá más adelante son los denominados pasivos. Este tipo de tecnología tiene parámetros predeterminados y su buen funcionamiento depende de unos parámetros predeterminados desde el diseño, por lo que no es “regulable”.

El sistema de suspensión suele estar ubicado en el vehículo entre el suelo y el bastidor. Suele estar conformado por los mismos componentes, variando tipos y dimensiones en función de los requerimientos.

Existen dos tipos básicos de suspensión, la denominada primaria y la secundaria. En trenes de mercancías normalmente solo existe la etapa primaria, mientras que los trenes de viajeros suelen tener las dos etapas.

La suspensión primaria, al estar más cerca del contacto rueda carril, tiene relación con la seguridad y fatiga de vía y vehículo, aunque también puede ser el primer punto de actuación para mejorar el confort. La suspensión secundaria está más focalizada en el confort, sin embargo, esto no quiere decir que no afecte a la seguridad y a la fatiga.

3.1.1 *Suspensión Primaria*

Entre el conjunto de ejes y ruedas y el bastidor del bogie o rodal, se intercala un sistema de suspensión denominado “suspensión primaria”. Es el primer órgano flexible del sistema de amortiguación.

La suspensión primaria cumple dos funciones. Por una parte reduce el nivel de vibraciones que soporta el bastidor del bogie y los elementos montados sobre él. Por otra parte asegura un reparto homogéneo de cargas sobre las ruedas, lo cual es fundamental de cara a las prestaciones de freno y tracción y para evitar el riesgo de descarrilamiento. A continuación, la Figura 3.1 muestra un esquema de una suspensión primaria

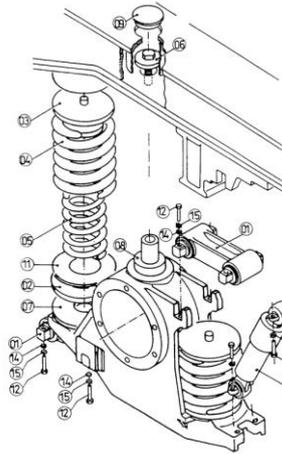


Figura 3.1: Esquema de suspensión primaria

Los elementos de la suspensión primaria, además de asegurar la suspensión vertical, están relacionados con el guiado de los ejes en direcciones longitudinales y laterales. Las rigideces de guiado resultan determinantes para definir la estabilidad dinámica del vehículo y los esfuerzos rueda-carril que se producen al paso por la curva.

A medida que aumentan las sollicitaciones dinámicas y velocidades, estas suspensiones primarias se complican, pasando del simple montaje de resorte y amortiguador, o de campanas de goma o caucho, a montajes muy complejos y avanzados como el que se muestra en la Figura 3.2.

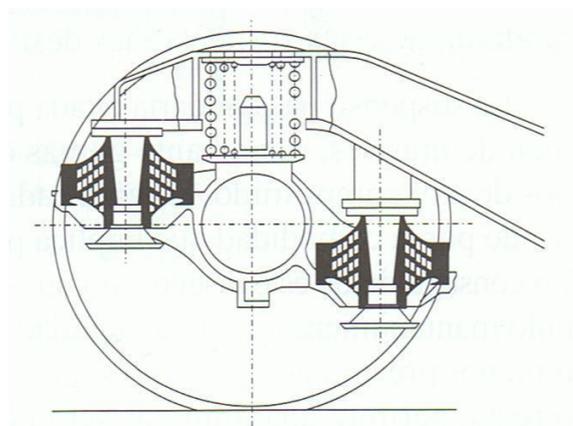


Figura 3.2: Esquema suspensión primaria moderna

Una de las líneas de investigación existentes hoy en día en el apartado de mejora del funcionamiento de este tipo de suspensiones y, sobre el que versa el presente trabajo, es la inclusión de sistemas inteligentes que permitan variar los coeficientes de amortiguación de la suspensión. Así, modificar las curvas de rigidez y las deformaciones según la carga para reducir las vibraciones y aceleraciones en la caja es posible.

3.1.2 Suspensión secundaria

A su vez, entre la propia caja del coche y el bogie o rodal, hay una segunda suspensión denominada suspensión secundaria.

La suspensión de los vehículos ferroviarios debe asegurar el filtrado de las vibraciones, no sólo en dirección vertical, sino también en dirección lateral. En los vehículos guiados este filtrado es responsabilidad en gran medida de la suspensión secundaria. Por este motivo, las suspensiones secundarias presentan una alta flexibilidad en ambas direcciones, vertical y lateral.

En dirección vertical es habitual la utilización de suspensiones con frecuencia natural próxima a 1 Hz. Esta elección se debe a que es en esta frecuencia en la que el ser humano mejor soporta los movimientos verticales ya que nuestro cuerpo oscila con esta frecuencia al caminar.

La suspensión secundaria suele estar compuesta hoy día por balonas neumáticas (aunque también existen otros tipos de tecnologías). Este diseño ofrece numerosas ventajas. Una de ellas es que el mantenimiento es nulo o mínimo. Por otro lado, es posible una fácil regulación mediante la variación de presión en las balonas de aire según la carga de viajeros o situación del tren en curva o recta. Así se mantiene constante la altura de piso respecto a los carriles. Adicionalmente, a partir de la presión infundida se obtiene la información de carga de viajeros, necesaria para la regulación eléctrica de motores. De esta manera se consigue información para los procesos de arranque y freno a aceleración constante e independiente de la carga.

El montaje real de estas suspensiones neumáticas consiste en disponer una balona (Figura 3.3) de aire por cada lado del bogie o rodal, sobre los cuales descansa la caja.

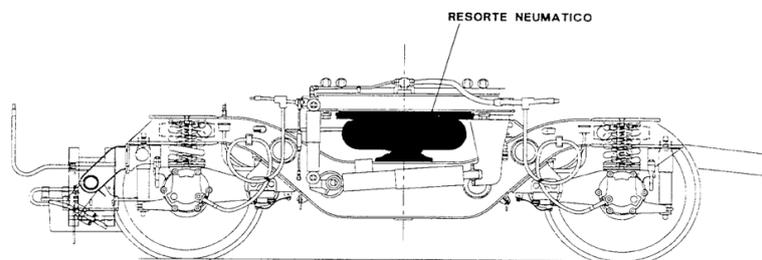


Figura 3.3: Montaje de balona neumática en suspensión secundaria

3.1.3 Elementos en la suspensión

En la suspensión de un vehículo existen múltiples tipos de elementos que permiten asegurar las funciones de confort, estabilidad, seguridad y calidad de marcha. Estos elementos se dividen en elásticos y amortiguadores. Los primeros garantizan la unión entre las partes relativas a la rodadura y el vehículo, aportando fuerza recuperadora cuando existe una separación entre dichos elementos. Los segundos son elementos disipadores de energía que hacen que decaiga el movimiento oscilatorio provocado por cualquier tipo de perturbación. En algunos casos, ciertos elementos poseen una doble función, son elásticos y amortiguadores.

Cualquier irregularidad en la vía se transmitirá en cierta medida a la caja y alterará el movimiento de la misma puesto que existe una unión entre la caja y la rodadura.

Cualquier tipo de vehículo ferroviario se divide en 3 partes:

- Masas suspendidas: Es la parte de la masa que es soportada por el sistema de suspensión completo.
- Masas no suspendidas: Es la parte que va desde el carril hasta la suspensión primaria. Engloba ruedas, ejes, discos de freno etc.
- Masas semi-suspendidas: Es la parte que engloba desde el final de la suspensión primaria hasta la suspensión secundaria. Está compuesto por el bogie o rodal, las balonas neumáticas etc.

Importante mencionar como se suelen distribuir los siguientes elementos. Los resortes de las suspensiones primarias suelen ser de tipo helicoidal, caucho metal o ballesta. Para las suspensiones secundarias los elementos más difundidos son los resortes neumáticos o helicoidales (en mucha menor cuantía hay caucho metal o ballestas). Estos elementos trabajan de manera conjunta con amortiguadores y barras de torsión.

➤ **Resortes helicoidales**

Los resortes helicoidales son los elementos de rigidez más empleados en las suspensiones de vehículos. Normalmente se encuentran trabajando a compresión. Son fabricados a partir de barras de acero de alta resistencia. Cuando se usa una sola hélice deben ser emparejados en ambos lados para compensar los pares de giro y así mantener una carga nula sobre el bogie o rodal.

En algunos vehículos ferroviarios es habitual utilizar resortes montados concéntricamente uno dentro otro. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de resorte helicoidal.



Figura 3.4: Muelle helicoidal

➤ **Resortes caucho-metal**

La utilización de resortes caucho metal es muy frecuente en suspensiones de maquinaria, motores etc. ya que filtran vibraciones de alta frecuencia asociadas a pequeños desplazamientos. Debido a la complejidad de las formas geométricas y al comportamiento no lineal del conjunto, el dimensionado de estos elementos y su cálculo de rigidez se realiza empleando el método de elementos finitos. En la Figura 3.5 se muestra un ejemplo de un resorte tipo caucho-metal.



Figura 3.5: Resorte caucho-metal

➤ **Resortes neumáticos**

Este tipo de tecnología está muy presente en las etapas de suspensión secundaria. La Figura 3.6 muestra un ejemplo.



Figura 3.6: Balona neumática ferroviaria

Los resortes de tipo neumático tienen la ventaja de poder mantener la altura constante independientemente de la masa de la carga. Esto es fundamental en cercanías ferrocarriles suburbanos y urbanos, donde la diferencia entre masas de tara y carga es elevada. Además poseen una gran capacidad de filtrado de altas frecuencias. Finalmente también atenúan los ruidos de las ruedas y frenos al evitar que exista una unión mecánica directa entre dichos elementos y la parte suspendida.

➤ **Ballestas**

Es uno de los componentes de suspensión más antiguo. Es económico, posee amortiguamiento propio y tiene la capacidad de soportar grandes cargas. La Figura 3.7 presenta un ejemplo de ballesta ferroviaria.



Figura 3.7: Suspensión de ballesta

En vehículos ferroviarios las ballestas se utilizan en trenes de mercancías debido a su gran capacidad de carga.

➤ **Amortiguadores**

El amortiguador tiene como misión devolver en el mínimo tiempo posible el resorte a la posición de equilibrio absorbiendo, desde el punto de vista del confort, la energía transmitida a la masa suspendida y reduciendo el tiempo en el cual la adherencia varía en las ruedas. En la Figura 3.8 se presenta un amortiguador como parte del sistema de suspensión ferroviario.

La amortiguación está normalmente compuesta a base de amortiguadores hidráulicos y en el caso de los bogies de mercancías del tipo Y21/25, de fricción seca.

La amortiguación, para los bogies de material remolcado o autopropulsado de viajeros, suelen ser vertical en la primaria; vertical, transversal u horizontal y anti lazo en la secundaria.

Para el caso de locomotoras también suelen ser los citados anteriormente, aunque los bogies de locomotoras pueden tener todo tipo de dispositivos incluyendo, naturalmente, los de transmisión de los esfuerzos de tracción.

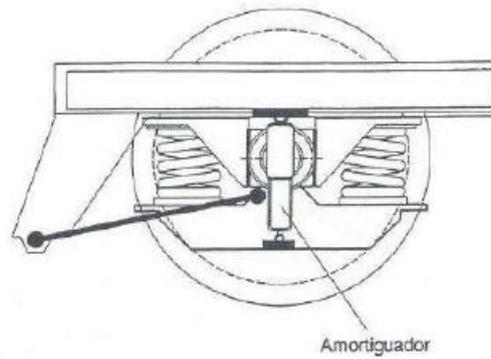


Figura 3.8: Amortiguador ferroviario

➤ Barras de torsión

Las barras de torsión (Figura 3.9) son elementos que, debido al ablandamiento de los amortiguadores verticales se incorporan a la suspensión de un gran número de vehículos ferroviarios. Su misión es la de reducir el ángulo de balanceo experimentado por el vehículo cuando recorre una curva.



Figura 3.9: Esquema de barra de torsión

3.2 Suspensión pasiva / tradicional

Los sistemas de suspensión pasivos o tradicionales se caracterizan por no recibir directamente aplicación alguna de energía externa. Almacenan energía mediante resortes y la disipan mediante amortiguadores. Sus parámetros no varían con el tiempo y corresponden a un compromiso de las características de la vía, la carga soportada y el confort medio requerido durante toda la vida del vehículo.

La Figura 3.10 muestra un sistema de suspensión pasiva, donde la representación d_{b1} ejemplifica al amortiguador que tiene unos parámetros fijos.

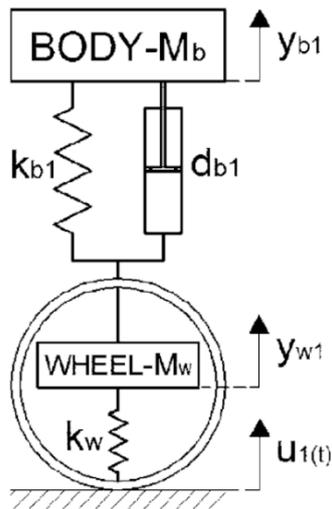


Figura 3.10: Representación esquemática de una suspensión pasiva

En un sistema de estas características se presentan problemas de confort cuando se modifican las rigideces o los coeficientes de amortiguamiento debido a modificaciones de pesos o a un fallo del propio sistema.

Como se introducirá más adelante, siendo parte del objetivo del proyecto, existen desarrollos para mejorar las características de la suspensión mediante diferentes tecnologías.

4 Estado del arte

En este punto se explicarán las principales fuentes donde se ha buscado información para saber hacia dónde tiende el campo de investigación cuando de suspensión inteligente se trata.

Existe una cantidad considerable de información relacionada con las suspensiones activas y su aplicación a vehículos ferroviarios, aunque la publicación de resultados es más escasa.

Las suspensiones inteligentes son un tema bastante recurrente en el mundo del transporte actual y, naturalmente existen múltiples puntos en común e ideas generales para los múltiples sectores. Debido a las naturalezas de las cargas, aceleraciones, y frecuencias en las que hay que actuar, el ferrocarril tiene sus propios campos de estudio y desarrollo. Algunos artículos y autores especializados en el tema son los siguientes:

- R.M. Goodall y T.X. Mei (2000)
- Múltiples artículos de Yoshiki Sugahara, algunos muy prometedores ya que se llega a estudiar la actuación y desarrollo de amortiguadores semi-activos verticales en la etapa primaria (2008-2011-2016)
- R.M. Goodall y Kortüm (2002). Donde se hace una visión global del estado del arte de las suspensiones activas.
- Yoshiyuki Maruyama (1997), que empieza a estudiar el desarrollo de suspensiones activas secundarias laterales.
- Anneli Orvnäs, (2010-2011) en cuyas investigaciones se incurre en la reducción de vibraciones mediante suspensiones activas y otros métodos.
- Artículos de NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL (2013) que hablan del desarrollo de sistemas electromecánicos para suspensiones activas secundarias laterales.

Como ya se ha ido mencionando, puede verse que existen dos tipos de suspensiones inteligentes, las activas y las semi-activas. Más adelante se explicará con mayor detenimiento cada una de ellas.

Con estos ejemplos puede empezar a verse como el principal desarrollo de este tipo de tecnología es Japón y que ahora Europa se está poniendo a la zaga. Para el tren Shinkansen, inicialmente se colocaba este tipo de tecnología en la suspensión secundaria lateral para evitar movimientos de lazo, aumentando así el confort. Al principio se instalaban sistemas semi-activos en algunos coches, hoy día, con la tecnología más desarrollada para ese ámbito en

concreto ya se instalan sistemas totalmente activos a lo largo de todo el tren. El primer tren que tuvo este tipo de tecnología fue la serie E500 (Figura 4.1) desarrollada por Kawasaki e Hitachi.



Figura 4.1: Serie E500 Shinkansen

A partir de ahí se ha ido incluyendo este tipo de tecnología en otras series como pueden ser:

- Serie 700, suspensión semi-activa lateral en todos los coches.
- Serie E3, suspensión activa en coches cabeza y semi-activa en coches intermedios. (Se implementó a posteriori)
- Serie E6, suspensión activa en todos los coches (Figura 4.2)

Poco a poco se va extendiendo el estudio de las suspensiones inteligentes en otros puntos además de la suspensión secundaria lateral.



Figura 4.2: Serie E6 Shinkansen

➤ **PATENTES**

Debido a lo anteriormente explicado, se han podido encontrar numerosas patentes japonesas a través de la Oficina Europea de Patentes. No obstante, Japón no es el único país que ha empezado a patentar ideas relacionadas con el desarrollo de tecnología activa. Otros ejemplos, por ejemplo son Alstom (Francia) o la alemana Liebherr, con presencia en múltiples sectores como minería. Tampoco hay que olvidarse de que en China, la alta velocidad posee un gran auge y debido a ello se están desarrollando tecnologías y patentando ideas. Algunos ejemplos de la documentación más interesante son:

- “*Amortiguador hidráulico activo y accionamiento regulador hidráulico*” (ES2648170T3) (LIEBHERR) (2017) (Especializado en vehículos ferroviarios, **puede funcionar verticalmente**)
- “*Aparato para amortiguado vertical, método para controlar vibraciones en vehículo ferroviario*” (JP2016210268A) (HITACHI) (2015) (Patente para reducir vibraciones en sentido **vertical**)
- “*Método para optimizar el confort en un vehículo ferroviario*” (EP3205548A1) (ALSTOM) (2016) (Cambia las propiedades en función del punto kilométrico)
- “*Aparato de control de vibraciones para vehículo ferroviario*” (JP2017030584A) (KYB) (2017) (Métodos para mejora para el sistema de suspensión horizontal semi-activo).
- “*Amortiguador para vehículo ferroviario*” (JP2010264919A) (NIPPON SHARYO) (2010) (Amortiguador semi-activo para oscilaciones laterales)
- “*Amortiguador para aislar vibraciones en vehículo ferroviario*” (JP2010225543A) (NIPPON SHARYO) (2012) (sistema de amortiguación activo de reducido espacio para oscilación lateral)

Estos son solo algunos ejemplos. Los más interesantes se han colocado al principio. Al buscar invenciones de este tipo puede verse que la tendencia hoy día es trabajar en la secundaria lateral haciéndola activa o semi-activa. No hay mucha información en cuanto a suspensiones primarias verticales activas se refiere, la vanguardia en este campo la llevan los japoneses con los estudios de Sugahara.

➤ **BENCHMARK**

Para la realización del benchmark se ha de buscar y recopilar información sobre todo lo que engloba tanto tecnologías activas como semi-activas y quién las fabrica. De este modo se obtiene un punto de referencia de cara a conocer el estado del arte en mayor profundidad y hacia dónde se quiere dirigir el estudio. Conocer lo que hay y cómo implementarlo es muy importante ya que un diseño inadecuado de suspensiones puede hacer que un material rodante excelente transmita malas sensaciones cuando circula. El diseño del sistema de suspensión de un tren es una tarea muy compleja y de importancia crucial para el éxito de mercado de una marca.

Los tres puntos clave a la hora de escoger una tecnología u otra son:

- Grado de control: se relaciona con la elección de la suspensión, ya sea activa o semi-activa.
- Estrategia con que se controla el actuador vehículo.
- Viabilidad de la implementación teniendo presente una variedad de cuestiones prácticas.

4.1 Suspensión activa

La suspensión activa almacena, disipa e introduce (diferencia fundamental) energía al sistema por medio de actuadores cuyo accionamiento es regulado a través de sensores y controladores. Figura 4.3 B) Para ejercer la fuerza de control se pueden utilizar múltiples clases de actuadores: electro-hidráulicos, neumáticos, electromagnéticos etc. Se puede ver una comparativa con el esquema tradicional pasivo en la Figura 4.3 A)

Se emplean sensores para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones y así definir la respuesta de acuerdo al objetivo de control. Un sistema de suspensión activa usualmente emplea una medida de la aceleración en diferentes puntos del vehículo. La gran ventaja de este sistema es que la fuerza de actuación puede no ser proporcional a la velocidad de trabajo, pudiendo ser regulada atendiendo a otros factores como la aceleración. La operación incorrecta de alguno de estos sensores puede conducir a un comportamiento indeseable de la suspensión.

4.2 Suspensión semi-activa

La suspensión semi-activa se caracteriza por disponer de sistemas de disipación de energía (amortiguadores) cuyo coeficiente de amortiguamiento puede variar mediante un control externo (dentro de un rango dado). La Figura 4.3 C) muestra un sistema de suspensión semi-activo en el que se distinguen los sensores, el controlador y el amortiguador. También se compara con el esquema clásico pasivo en la Figura 4.3 A)

Para controlar el coeficiente de amortiguado existen múltiples tecnologías: magnetoreológicos, neumáticos, hidráulicos, etc.

Una de las ventajas que posee este tipo de suspensiones con respecto a sistemas activos es su mayor simplicidad. No se necesita una fuente externa de energía para el actuador. No obstante, existe la desventaja de que la fuerza que puede ejercer el sistema es proporcional a la velocidad de la suspensión. Por lo tanto, el sistema no podrá proporcionar grandes fuerzas de amortiguamiento cuando la velocidad sea muy baja.

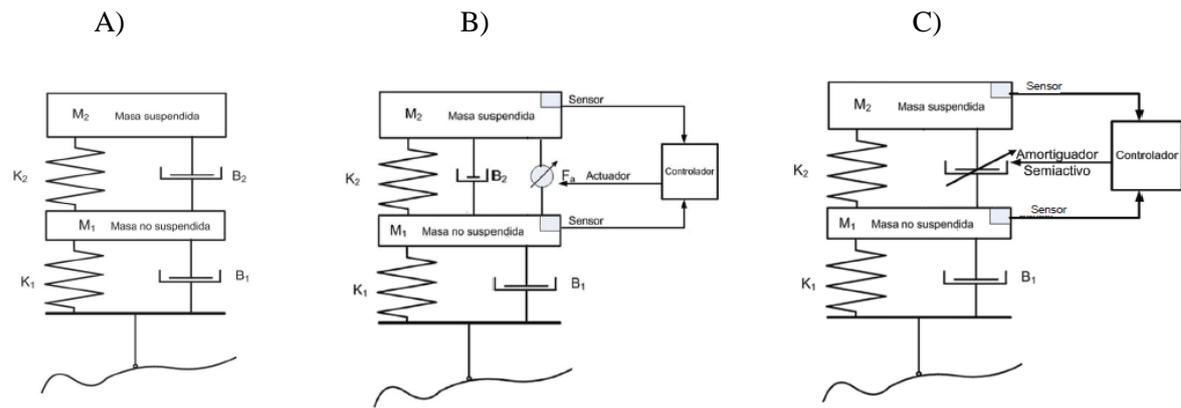


Figura 4.3: Esquema de sistemas de amortiguador pasivo, activo y semi-activo

4.3 Principales diferencias entre amortiguación activa Vs. Semi-activa

Seguidamente se nombrarán algunas de las principales ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas activos y semi-activos. Estos son aspectos que hay que tener muy en cuenta a la hora de realizar una elección adecuada.

➤ Ventajas semi-activo

- Menor coste de implementación
- Menor consumo energético
- Control más sencillo
- Diseño más simple
- Instalación más elemental

➤ Desventajas semi-activo

- Restricciones en la fuerza de amortiguamiento: el rango de fuerzas es limitado. Se depende de la velocidad del sistema para amortiguar y apenas se puede ejercer fuerza de amortiguamiento si el dispositivo opera lentamente.
- Las cualidades técnicas de la tecnología semi-activa poseen menores prestaciones que los sistemas activos.

➤ Ventajas activo

- Rango de fuerzas de actuación más amplio
- No existe limitación debida a la interdependencia que tienen los sistemas pasivos y semi-activos entre fuerza de amortiguamiento y velocidad
- Se pueden llegar a alcanzar mejores cualidades técnicas y por ende, mejor dinámica de vehículo y confort

➤ **Desventajas activo**

- Posee mayor consumo energético.
- El mecanismo es más pesado y caro tanto para comprar como para mantener.
- Para instalar una suspensión activa a un vehículo existente habría que realizar un mayor número de modificaciones.

4.4 **Tipos de actuadores para suspensiones activa y semi-activa**

A lo largo de los años se han ido desarrollado múltiples formas de variar la fuerza en los sistemas de amortiguación. En función de si se actúa en una suspensión activa o semi-activa y si se opera en la suspensión primaria o secundaria se deberá usar una tecnología u otra. También hay otros factores influyentes, como la dirección de actuación o el coste.

4.4.1 *Actuadores para suspensión activa*

- **Actuador neumático**

En un actuador neumático se controla la presión de aire del sistema. Presenta algunas ventajas, como por ejemplo la simplicidad de ser integrado en el tren al conectarlo directamente a sistemas que ya están presentes, como es el circuito de aire comprimido. No obstante, este tipo de actuadores consumen bastante aire y este ya se necesita para muchas otras cosas como el freno, las balonas, puertas, inodoros etc. Otro problema adicional es el tiempo de respuesta que ofrecen estos sistemas y que la fuerza que pueden aplicar suele ser baja.

- **Actuador electromecánico**

Este tipo de actuadores convierte la rotación de motor eléctrico en un movimiento lineal utilizando un husillo. En general este tipo de actuadores son menos compactos que otros tipos pero tienen bajos niveles de ruido. La Figura 4.4 muestra un esquema de actuador electromecánico.

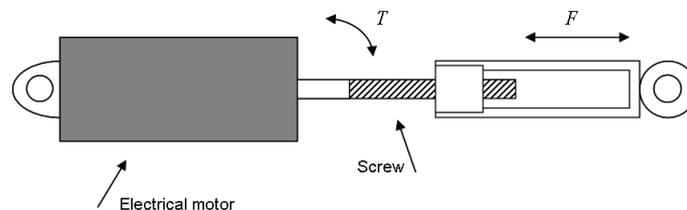


Figura 4.4: Esquema actuador electromecánico

- **Actuador electrohidráulico**

El actuador electro hidráulico consiste en un motor eléctrico y una bomba hidráulica integradas en un único elemento. Por este motivo, no es necesario tener un circuito hidráulico de manera

separada. Generalmente este tipo de actuadores poseen una respuesta rápida y son capaces de proporcionar fuerza indefinidamente sin calentarse excesivamente. Este tipo de actuador se considera prometedor para las nuevas generaciones de trenes en los ferrocarriles europeos. La Figura 4.5 muestra un esquema de actuador electrohidráulico.

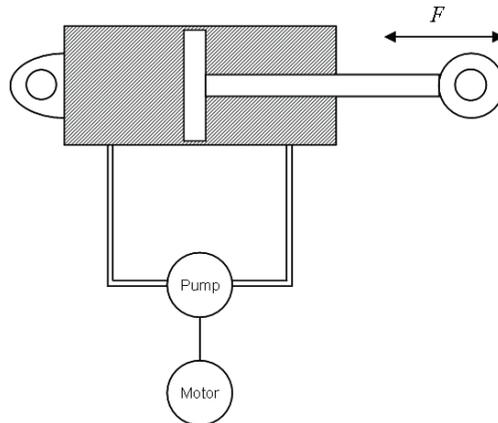


Figura 4.5: Esquema actuador electrohidráulico

- **Motor de bobina móvil (VCM)**

El motor de bobina móvil es un actuador lineal equivalente a lo empleado en las bobinas de un altavoz. El empuje es generado por la fuerza de Lorentz, que surge debido a la corriente eléctrica aplicada a la bobina en presencia del campo magnético generado por un imán permanente. Sin embargo, para poder realizar una fuerza necesaria como para trabajar dentro del entorno ferroviario, su tamaño sería excesivo. Otro problema es el coste. Por lo que este tipo de actuadores no tienen mucha cabida en el sector.

- **Motor síncrono lineal (LSM)**

El motor síncrono lineal es un motor síncrono de actuación directa. El empuje es generado por la atracción de un imán permanente y un campo magnético variable formado por electroimanes dispuestos en dirección al empuje. Su control es simple, su eficiencia alta y existe versatilidad con respecto al empuje. El principal problema es el coste y el peso, por lo que nuevamente, junto con el VCM queda desechado este tipo de tecnología para el sector ferroviario. .

4.4.2 Actuadores para suspensión semi-activa

- **Fluido magnetoreológico**

El principio de funcionamiento de este tipo de amortiguadores consiste en llenar la cámara interior de un fluido de baja viscosidad que tenga partículas magnéticas en suspensión. Cuando se somete el sistema a un campo magnético la viscosidad del fluido interior cambia y por ende, su coeficiente de amortiguamiento. Cuanto más fuerte sea el campo, más fuerte será el coeficiente amortiguador. Este tipo de actuadores son bastante baratos de fabricar y además tienen poco consumo energético. Adicionalmente también tienen una respuesta muy rápida. La Figura 4.6 da una idea del funcionamiento de este tipo de amortiguadores.

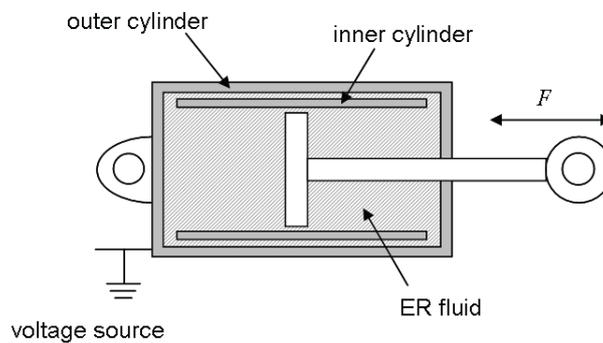


Figura 4.6: Esquema amortiguador magnetoreológico

- **Variador de sección de válvula**

Otra forma de variar el coeficiente de amortiguamiento de un sistema consiste en variar la sección de paso del fluido y así modificar el factor de amortiguamiento. Esto se puede hacer de manera electrónica (en función de una señal externa con una válvula) o mecánica (dependiendo de la frecuencia de actuación). Este tipo de actuadores se suelen usar en las balonas de aire de la suspensión secundaria y/o en amortiguadores hidráulicos.

- **Elementos neumáticos**

En los elementos neumáticos, la variable a regular es la presión del aire. En función de dicha presión se regula el coeficiente de amortiguamiento. Como ya se ha comentado anteriormente, un sistema neumático presenta la ventaja de que puede servirse de sistemas ya instalados en el tren. El aire presenta una elevada compresibilidad haciendo controlable tan sólo un ancho de banda de 2 a 3 Hz, lo que limita mucho a este tipo de dispositivos. Además, la fuerza que puede proporcionar un amortiguador neumático es bastante menor en relación a un amortiguador hidráulico.

4.5 Estrategias de control para sistemas activos y semi-activos

La elección de la estrategia de control más adecuada es uno de los principales desafíos en el diseño de una suspensión activa y semi-activa. La finalidad del control en una suspensión tiene múltiples objetivos. Se define cómo mejorar la maniobrabilidad, incrementar el confort y reducir la potencia para el controlador [7].

Asimismo, en una suspensión real hay que considerar no linealidades como fricción de Coulomb, histéresis, zonas muertas, saturaciones, etc. Para la solución de estos problemas se han aplicado metodologías de control convencional e inteligente.

4.5.1 Control proporcional, integral y derivativo (PID)

El control PID es un sistema de lazo cerrado que usa la señal de error dada por la diferencia entre la entrada deseada y la salida real del sistema. Tiene como ventaja que da una respuesta y compensación rápida de la señal de error frente a perturbaciones. La Figura 4.7 ejemplifica su funcionamiento.

El ajuste de los tres parámetros del control PID es crítico para evitar oscilaciones del sistema y puede ser realizado por aproximaciones teóricas, por optimización considerando las ganancias como factores de diseño, y por heurística usando control borroso para una auto-regulación en línea. También se ha propuesto el uso de controladores PID con doble realimentación: una interna para el control de fuerza y otra externa para el control de la carrera de la suspensión.

El PID crea una señal input u para el procesador del sistema que trata de corregir el error entre la señal de referencia r y la señal de salida y .

El control PID se describe matemáticamente de la siguiente forma:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(s) ds + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

Los coeficientes K_P , K_I y K_D son los coeficientes del controlador proporcional, integral y derivativo respectivamente. El algoritmo PID es relativamente simple y ofrece un funcionamiento robusto. El principal reto es encontrar unos parámetros de control adecuados.

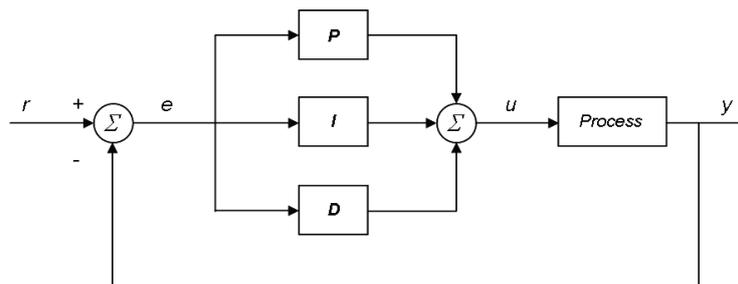


Figura 4.7: Esquema de funcionamiento de un controlador PID

4.5.2 El control SKYHOOK

El control *Skyhook* está basado en un amortiguador ficticio instalado entre el conjunto y un punto fijo estacionario “cielo”. De este modo, el control del amortiguador es solamente dependiente de la velocidad absoluta de la masa suspendida. Este método es utilizado sobre todo en el control de suspensiones semi-activas. El confort se proporciona al reducir la aceleración de la masa suspendida, pero con limitaciones en la maniobrabilidad. La Figura 4.8 muestra la diferencia entre el planteamiento de un sistema convencional y un sistema *Skyhook*.

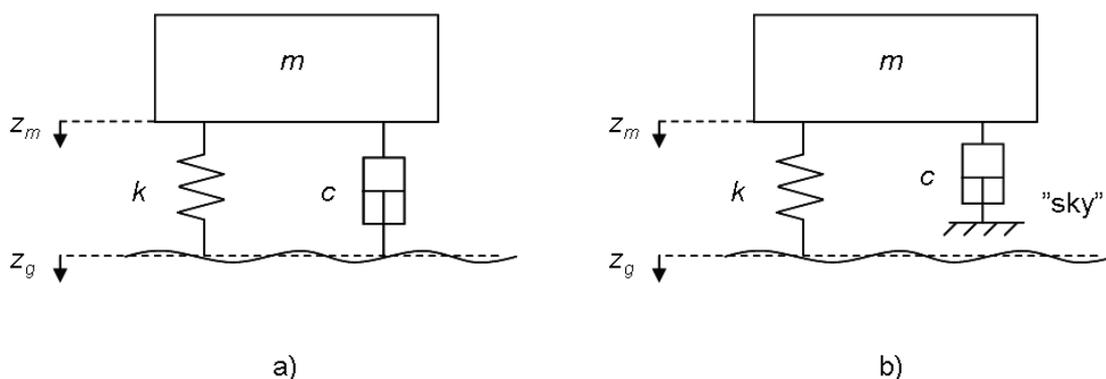


Figura 4.8: Esquema de amortiguador convencional (a) Vs. aproximación *Skyhook* (b)

Para un sistema convencional la fuerza quedaría expresada como:

$$m\ddot{Z}_m = (\dot{Z}_g - \dot{Z}_m)c + (Z_g - Z_m)k$$

Y su función de transferencia se expresaría como:

$$G_{pasiva} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k}$$

Con un sistema con el planteamiento *Skyhook* la fuerza se expresaría como:

$$m\ddot{Z}_m = -\dot{Z}_m c_{sky} + (Z_g - Z_m)k$$

Su función de transferencia será la siguiente:

$$G_{Skyhook} = \frac{k}{ms^2 + c_{sky}s + k}$$

Debido a que el término relativo al punto fijo (relacionado con irregularidades de alta frecuencia) no está incluido, el aislamiento es más sencillo. Se trata de un concepto denominado “*amortiguado de velocidad absoluta*”, puesto que es la velocidad absoluta del cuerpo en combinación con el amortiguador con el coeficiente del *Skyhook* el que crea la fuerza de amortiguamiento. Este tipo de control ofrece una mejoría significativa especialmente en recta. Cuando se entra en curva existen una serie de desplazamientos entre la rodadura y la caja que

hacen que el control sea un poco más complejo. Esto se solventa combinando el control *Skyhook* con un control /filtro de bajo ancho de banda para centrar la caja con la rodadura. Una de sus principales ventajas es su nivel y simplicidad de regulación.

La transmisibilidad de una suspensión pasiva se puede expresar de la siguiente forma [8]:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{1 + j2\zeta_P\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\zeta_P\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}$$

En cambio, con *Skyhook* la función de transmisibilidad queda de la siguiente forma:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\zeta_{SKY}\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}$$

Gracias al hecho de poder variar el coeficiente de amortiguamiento, la ecuación es más sencilla.

Si se representan en una gráfica puede verse la tendencia de cada sistema a la hora de amortiguar.

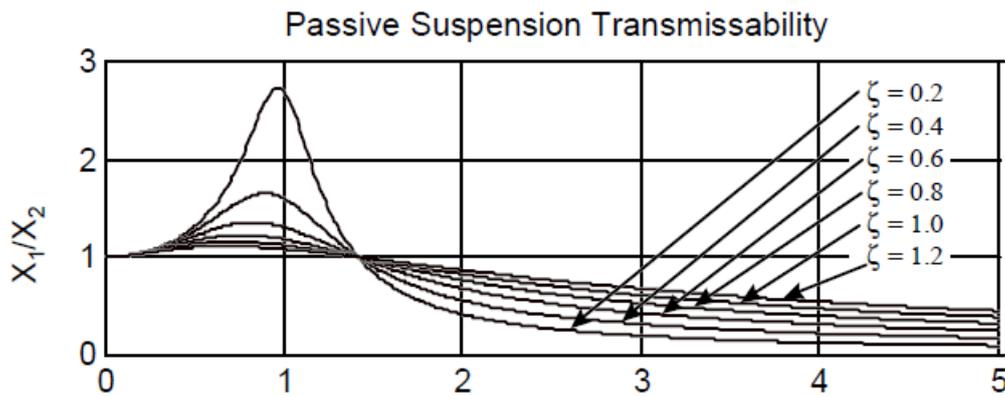


Figura 4.9: Transmisibilidad de sistema de suspensión pasivo

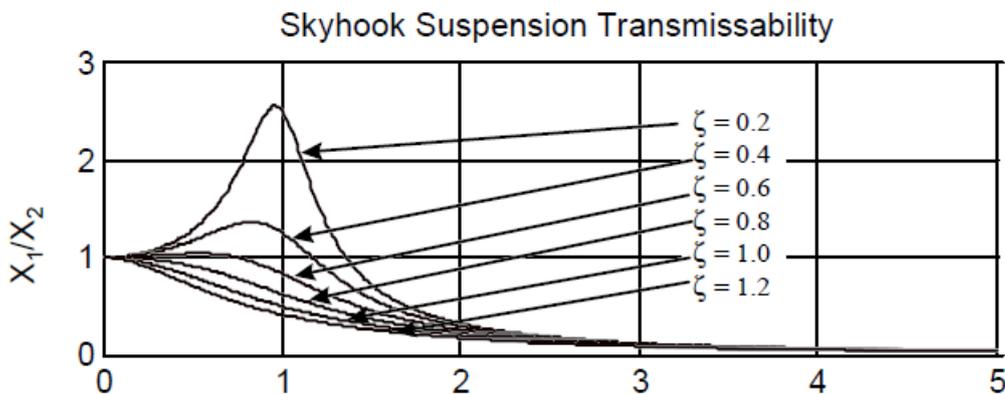


Figura 4.10: Transmisibilidad de sistema *Skyhook*

Como se aprecia, en el sistema *Skyhook*, al variar el coeficiente de amortiguamiento se puede utilizar la curva de transmisibilidad óptima en función del caso que se esté dando.

4.5.3 El control en función de la frecuencia de actuación (Control mecánico FSD)

En los amortiguadores estándar la fuerza característica depende de la circulación del fluido a través del conjunto. Existen mecanismos cuya forma de actuar consiste en dividir las dos zonas de trabajo óptimas conforme a dos frecuencias y un muelle excitado es el encargado de permitir el paso de fluido o no.

Con un control mecánico dependiente de la frecuencia se controla en paralelo una válvula que puede aumentar la capacidad de amortiguamiento del sistema gracias a un baipás. Este tipo de controles son más simples y económicos que la tecnología electrónica.

- De cara al confort: Cuando la suspensión se mueve a frecuencias relativamente altas se dispone de la fuerza necesaria de amortiguamiento adecuada para que el vehículo sea cómodo.
- De cara a la operación: Cuando la suspensión trabaja a unas frecuencias de excitación bajas se dispone de otra fuerza de amortiguamiento diferente que mejora el comportamiento del sistema en ese rango.

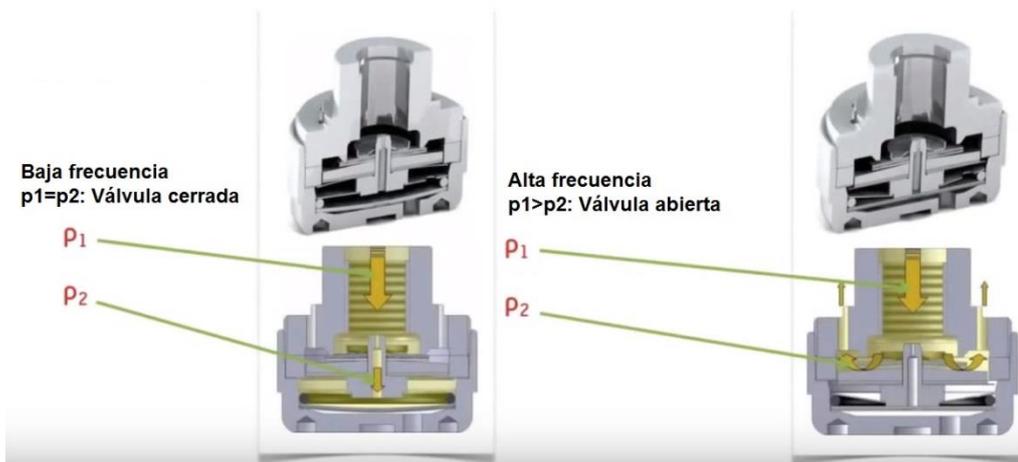
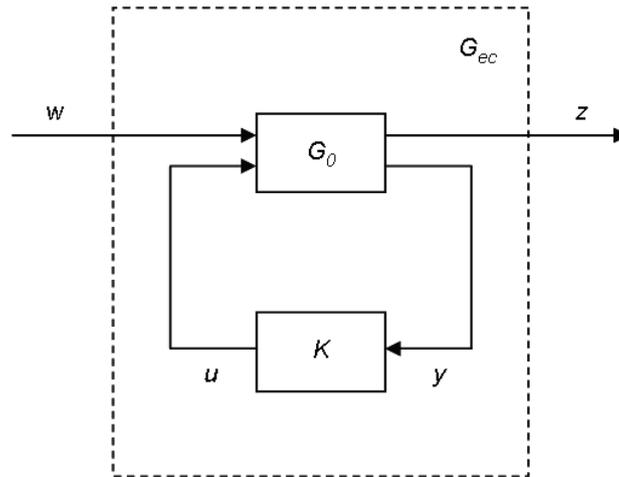


Figura 4.11: Baipaseado para modificación de fuerza de amortiguamiento en función de frecuencia

4.5.4 El Control H_∞

La metodología de control avanzado busca definir un controlador para la parte abierta del lazo del sistema, de modo que la parte del lazo cerrado tenga un buen rendimiento, estabilidad y robustez. La Figura 4.12 muestra un esquema de este tipo de control. K es la parte relacionada con el lazo cerrado del controlador y, junto G_0 (que está vinculado al lazo abierto), se termina de definir la estructura completa del controlador, el cual se define como el sistema G_{ec} .

Figura 4.12: Esquema control H_∞

Las siguientes ecuaciones describen el comportamiento del sistema.

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G_0(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}$$

$$u = K(s)y$$

$$z = G_{ec}(G_0, K)w$$

4.5.5 El control óptimo LQ/LQG

El control óptimo implica la optimización de un sistema con al menos una función de costo que satisface las restricciones dadas por ecuaciones de estado. Su uso se recomienda cuando el comportamiento del sistema tiene incertidumbres.

El sistema dinámico queda descrito mediante ecuaciones diferenciales lineales y una función de costo cuadrático (que ha de ser minimizada). Con lo anteriormente dicho se describe una función LQ, si esta posee una distribución normal (Gaussiana) entonces se considera LQG.

En la teoría de control el problema del LQG es uno de los más fundamentales para el control óptimo de sistemas no lineales perturbados. Se le acostumbra a añadir un filtro de Kalman para eliminar posibles ruidos, lo cual añade complejidad al controlador en sí mismo. El filtro de Kalman es un algoritmo de control óptimo que sirve para poder identificar un estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal. Este filtro funciona incluso cuando el sistema está sometido a ruido blanco (señal aleatoria) aditivo. El filtro de Kalman es capaz de elegir la ganancia del

controlador de manera óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema.

4.5.6 Otros métodos de control

Las tecnologías previamente mencionadas son las más empleadas y las que tienen mayor impacto, no obstante, no son las únicas que existen. A continuación se citan más tecnologías existentes en el campo de control de suspensión activa y semi-activa.

➤ El control en función del punto kilométrico

Alstom [5] ha patentado un método en el que el ajuste de los parámetros de la suspensión queda parametrizado en función del punto kilométrico, la carga y la velocidad del tren. La vía se divide en diferentes tramos y a cada tramo se le asignan una serie de características óptimas en la suspensión en función de la carga y la velocidad.

Mediante múltiples pasadas para la adquisición de datos y algoritmos metaheurísticos se es capaz de controlar los parámetros de la suspensión en función de datos previamente guardados en otros trayectos para la obtención de un índice de confort óptimo.

➤ El control por modos deslizantes

El control por modos deslizantes se caracteriza por su robustez e insensibilidad a las perturbaciones. Así, un cambio en los parámetros del vehículo no afecta al rendimiento de una suspensión activa, lográndose un incremento en el confort al disminuir el movimiento. También es efectivo en la reducción de las vibraciones en máquinas. Presenta el inconveniente de oscilar a altas frecuencias y para evitarlo se ha propuesto combinarlo con el control *Skyhook*.

Los modos deslizantes plantean una ley de control imponiendo una acción de control discontinua u que tome un valor entre dos posibles:

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{si } s(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{si } s(x) < 0 \end{cases}$$

$$u^+(x) \neq u^-(x)$$

➤ El control adaptativo

El control adaptativo permite ajustar automáticamente sus características para operar óptimamente en un ambiente cambiante, reduciendo las perturbaciones y la vibración del vehículo a niveles especificados, los más representativos son:

- Auto-ajustables: cuando emulan el comportamiento dinámico optimizando el confort para el estado dado considerando la carga dinámica y la deflexión en la suspensión. Un

esquema (borroso con habilidad de aprendizaje en línea para compensar el error de aproximación funcional) permite diseñar el controlador adaptativo sin requerir el modelo dinámico del sistema. También se puede autorregular el factor de escala de salida de un control borroso de acuerdo a la tendencia del proceso.

- Con modelo de referencia: permiten reducir la perturbación y la vibración a niveles “ideales”. El modelo puede expresarse en forma de red neuronal. No obstante, cuando el sistema de suspensión está compuesto de actuadores hidráulicos su comportamiento es no lineal y variable con el tiempo, siendo difícil la construcción de un controlador basado en modelos.

➤ **Las metodologías de control inteligente**

Las metodologías de control inteligente surgen para resolver el problema de tratar con sistemas complejos y multivariables. Este es el caso de la suspensión en un vehículo real, el cual es altamente no lineal, con incertidumbres e imprecisiones. Las principales técnicas de inteligencia artificial aplicadas al modelado y control de estos sistemas son la lógica borrosa, las redes neuronales y los algoritmos evolutivos y bio-inspirados.

○ **El control borroso**

El control borroso (FLC) usa variables lingüísticas y la teoría de conjuntos borrosos para formar algoritmos de control capaces de emular la lógica humana, sin necesidad de una descripción exacta del sistema. Esta técnica permite:

- Realizar un control adaptable mediante mínimos cuadrados de la fuerza del actuador
- Realizar variantes no lineales del algoritmo PID
- Obtener las reglas borrosas usando como variables de entrada combinaciones lineales de velocidades y el desplazamiento del cuerpo del vehículo.
- Determinar el FLC por la información de la superficie de rodadura futura.
- Generar el coeficiente de amortiguamiento con un reducido número de reglas borrosas y mejorar la estabilidad del sistema mediante una jerarquía de reglas borrosas.

○ **El control neuronal**

La utilización de redes neuronales hace posible el uso de sensores económicos en el diseño del sistema de control. A partir de modelos neuronales se pueden obtener algoritmos de entrenamiento supervisados y no supervisados. Su funcionalidad está demostrada por la aplicación a sistemas de suspensión semi-activa sin requerir de un conocimiento completo de la dinámica del sistema. Una red neuronal puede ser entrenada para controlar sistemas de suspensión activos y semi-activos y consigue:

- Emular un controlador existente.
- Realizar un control adaptativo combinando una red para el regulador y otra para el modelo de referencia.
- Controlar un sistema no modelado a través de una función de rendimiento elegida adecuadamente y de una señal de error.
- Ajustar los parámetros de aprendizaje de la red con un método de corrección y predicción.

5 Definición de requerimientos

A la hora de escoger una tecnología, además de decantarse por las suspensiones activas o semi-activas. Existen otros aspectos a tener en consideración dada la naturaleza del sector para el que se quiere aplicar esta tecnología, es decir, sector ferroviario y de alta velocidad.

➤ REQUERIMIENTOS

Los primeros requerimientos ya pueden servir de filtro inicial ante unas tecnologías u otras ya que puede que no todos los proveedores puedan satisfacer los requisitos con su tecnología actual.

Como filtro inicial se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Rigidez para régimen de trabajo medio.
- Rigidez para régimen de trabajo máximo (en sistemas pasivos la curva rigidez/velocidad no es lineal).
- Frecuencias a partir de las cuales empezar a filtrar.
- Picos de aceleración.
- La media cuadrática (RMS) de régimen de trabajo de aceleraciones
- La fuerza máxima que debe poder desarrollar el actuador
- La fuerza máxima que podría aguantar el soporte de la suspensión.
- El recorrido mínimo necesario
- Espacio disponible para el actuador.

Además de estos requerimientos, también hay que tener en cuenta otros aspectos como pueden ser:

- Tiempo de reacción del actuador.
- Tipo de tecnología de control del actuador.
- Velocidad máxima de actuación.
- Rango de frecuencias en que el actuador puede trabajar.
- Tipo de control integrado en el sistema.
- Fiabilidad y tiempo de vida.
- Peso y dimensiones principales.
- Actuadores montados en paralelo con muelles helicoidales

Para poder poner todo esto en claro a continuación se explica una serie de conceptos relacionados con la seguridad, la fiabilidad, dinámica de caja, vibraciones, confort etc.

5.1 Seguridad y fiabilidad

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de escoger una tecnología u otra son los aspectos de seguridad y fiabilidad.

El sector ferroviario está caracterizado por su alta seguridad y baja tasa de accidentes. Por tanto, un aspecto como la suspensión, que puede afectar no solo al confort sino a la estabilidad de marcha, no puede estar exento de cumplir una serie de exigentes criterios de seguridad y fiabilidad. Estos principios deben estar presentes desde el principio para realizar el mejor diseño posible.

Además de lo dicho, se ha de tener en cuenta la filosofía “Fail-Safe” tan presente en el sector ferroviario. Las cosas han de ser diseñadas con el criterio de que en el hipotético caso de fallo y, trabajando en un estado degradado, el sistema derive a un estado en el que la seguridad de las personas no se vea afectada en ningún caso.

Para conseguir un comportamiento que cumpla con el “Fail-Safe” se debe garantizar que si el actuador, activo o semi-activo, dejase de funcionar aún tendría un coeficiente de amortiguamiento y se comportara como un sistema de suspensión pasivo. Es evidente que si esta situación se da, las prestaciones se verán afectadas y por lo tanto no se podrá operar el tren al 100%. Debido a ello, además de un sistema de suspensión que amortigüe incluso de forma degradada, habrá que monitorizar el estado del conjunto. Si el rendimiento no es el esperado ya se ha mencionado que la dinámica de marcha puede verse afectada y por lo tanto, el sistema debe estar enterado en todo caso.

Otro aspecto fundamental en el caso de fallo es el tiempo de transición desde un estado donde el tren está operando al 100% hacia la situación degradada. La metodología de diseño debe ser tal que no exista peligro para el sistema en ningún caso. En caso de fallo se podrían admitir vibraciones que puedan ser desconfortables mientras se pasa de estado operativo al 100% a uno degradado, pero nunca se podrá existir peligro como tal. Debido a ello, algunos sistemas incorporan una válvula mediante la cual, si ocurre un fallo, el sistema opera como un amortiguador pasivo en un tiempo prácticamente instantáneo. De este modo, un análisis modal de fallos y efectos es algo que se debe hacer (AMFE).

Para garantizar un comportamiento seguro y fiable hay que tener en consideración que el mantenimiento es otro aspecto fundamental. No solo para asegurar que el actuador se encuentre en condiciones adecuadas sino que, en función del estado, se pueda prever si se llegará al siguiente ciclo de mantenimiento. Esto minimiza la posibilidad de que el amortiguador tenga que trabajar en condiciones degradadas, aumentando así la seguridad y la disponibilidad.

5.2 Dinámica de caja y vibraciones

Para poder mejorar el confort de viaje es importante tener conocimiento de los diferentes modos de vibración de la caja. Las vibraciones son causadas principalmente por las irregularidades de la vía que son transmitidas a través de los bogies o rodales. El confort está directamente relacionado con las aceleraciones de caja y por lo tanto, reducir las vibraciones es algo esencial.

Los modos de vibración se dividen en dos, los relativos al sólido rígido y aquellos relacionados con el sólido flexible. Los movimientos que afectan al modo de vibración de sólido rígido dependen de los seis grados de libertad de la caja. Los desplazamientos reciben el nombre de vaivén, serpeo y sacudidas. Los giros son el lazo, cabeceo y balanceo. En la Figura 5.1 se pueden ver cómo están distribuidos estos movimientos según su dirección de actuación y cómo afectan a la dinámica de caja.

El diseño del tren se ha de realizar de modo que estos modos no coincidan con aquellos rangos donde el ser humano es sensible, por ejemplo, verticalmente se debe tener del orden de 1 Hz. El diseño también ha de estar hecho de modo que las vibraciones en marcha no coincidan con los modos propios del tren, lo que lo haría entrar en resonancia.

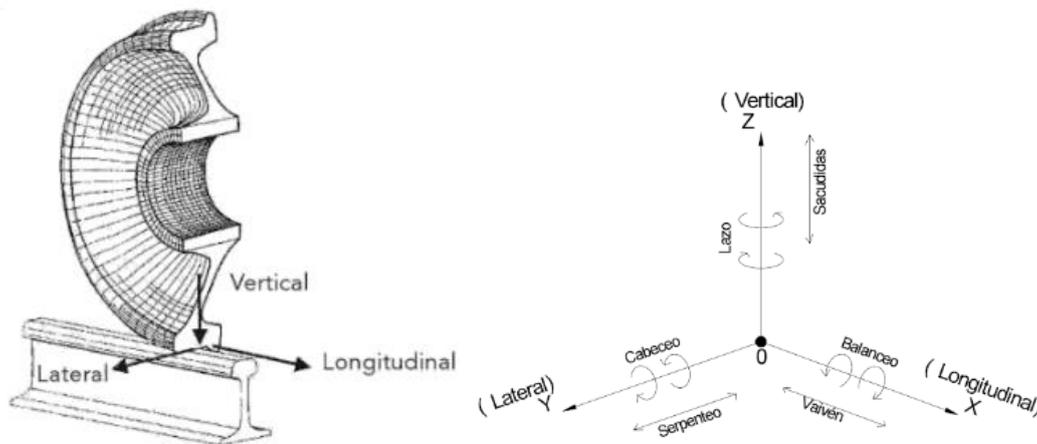


Figura 5.1: Ejes de actuación de las fuerzas y sus movimientos relacionados

➤ Movimientos de rotación de caja

[6] En torno al eje longitudinal, balanceo: Movimiento de la parte superior del vehículo alrededor de un eje paralelo a la vía. El balanceo es producido por defectos aislados de rectitud transversal. Producen desgastes anormales del carril. La Figura 5.2 muestra el movimiento.

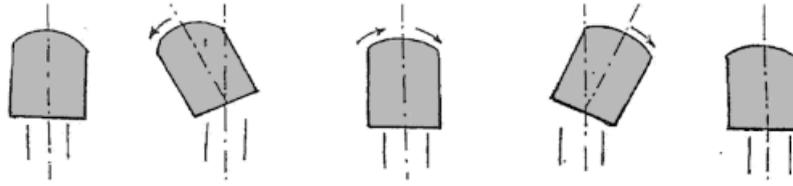


Figura 5.2: Balanceo de un vehículo ferroviario

En torno al eje lateral, cabeceo: Movimiento de la parte superior del vehículo alrededor de un eje horizontal perpendicular al raíl. Este movimiento surge cuando la rodadura se topa con un defecto de perfil en el raíl o existe algún desnivel en las uniones. La Figura 5.3 ilustra este movimiento.

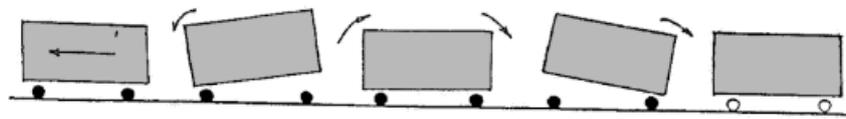


Figura 5.3: Cabeceo de un vehículo ferroviario

En torno al eje vertical, lazo: Movimiento del vehículo alrededor de un eje vertical y perpendicular al eje de vía. Es el más importante de cara a la estabilidad dinámica y resulta de los movimientos de traslación y pivoteo. El origen de estas oscilaciones proviene de la imperiosa necesidad de admitir un juego entre las pestañas de la rueda y las líneas directrices de la vía. La Figura 5.4 ejemplifica este movimiento.

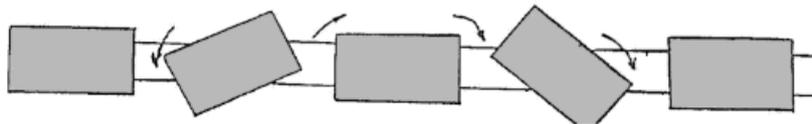


Figura 5.4: Movimiento de lazo de un vehículo ferroviario

➤ **Movimientos de traslación de caja**

En torno al eje longitudinal, vaivén: Movimiento del vehículo completo de manera paralela a los raíles en dirección longitudinal. La Figura 5.5 ejemplifica este movimiento.

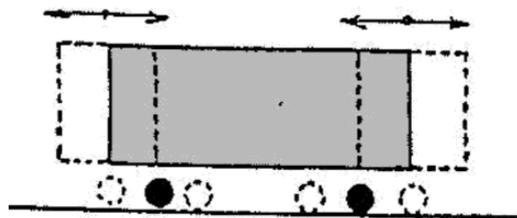


Figura 5.5: Vaivén de un vehículo ferroviario

En torno al eje lateral, serpenteo: Movimiento perpendicular a los raíles. Principalmente se debe al juego existente entre pestaña de rueda y carril. La Figura 5.6 muestra un ejemplo.

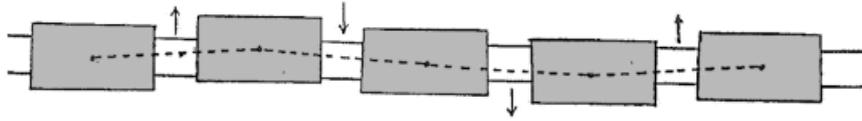


Figura 5.6: Serpenteo de un vehículo ferroviario

En torno al eje vertical, sacudida: Movimiento de la parte superior del vehículo en sentido vertical. Puede deberse a las irregularidades en la nivelación longitudinal de la vía o por un mal estado en la suspensión. La Figura 5.7 propone un ejemplo.

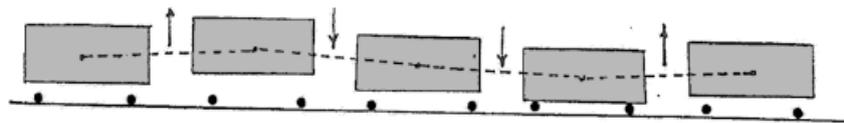


Figura 5.7: Sacudida de un vehículo ferroviario

➤ **Movimientos debidos a vibración por deformación de caja**

Los modos de vibración por deformación, al tratarse de un estudio de un medio continuo poseen prácticamente infinitos grados de libertad. No obstante, estos modos están delimitados por aquellos lugares donde puedan afectar a temas como ruido, confort o estabilidad. Los modos más importantes son los relativos a la torsión y a flexión de la caja debido a las aceleraciones inerciales que actúan sobre la misma. A continuación La Figura 5.8 hace una representación de cómo son algunos de estos movimientos. Normalmente las frecuencias del primer modo de vibración están en torno a los 8-15 Hz [1]. Con lo anteriormente dicho y teniendo presente que el cuerpo humano es especialmente sensible en dirección vertical en un rango de vibraciones de 4-10 Hz [2] se habrá de hacer un diseño en el cual los modos propios de vibración de la caja no coincidan con aquellos que puedan afectar al cuerpo.

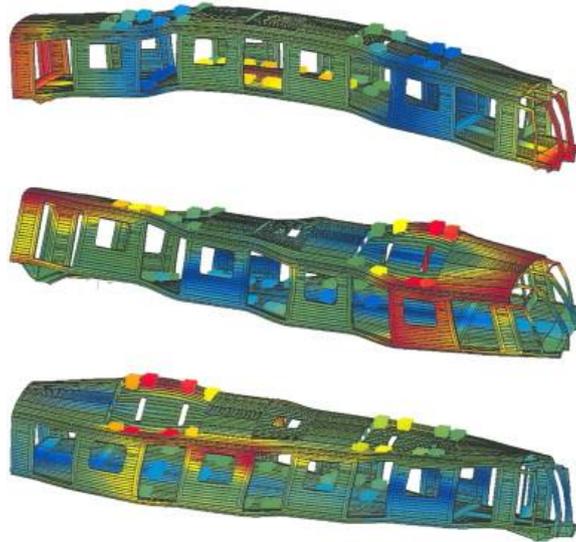


Figura 5.8: Representación de algunos modos de vibración por deformación de caja

Existen estudios de como la flexibilidad vertical de la caja afecta al confort de viaje. Aquí, el primer modo de vibración es el que tiene la mayor influencia. Cuando la rigidez estructural de la caja mengua, también lo hacen las frecuencias por flexión lo que aumenta el riesgo de introducir modos de vibración peligrosos a la caja. Si el primer modo de vibración por flexión es inferior a 7 Hz la caja es muy flexible y vibrará con facilidad.

5.3 Métodos de evaluación del confort

Tener un buen confort de marcha es un asunto clave a la hora diseñar un vehículo ferroviario. Hay que tener en cuenta que diferentes condiciones de trabajo implican distintos métodos de evaluación y, por lo tanto, es complicado establecer un criterio universal aplicable al material rodante.

Un problema del confort es que es un asunto difícil de evaluar puesto que en él intervienen parámetros subjetivos de los pasajeros. Lo que para alguien es cómodo puede no serlo para otra persona. Además, parámetros como las vibraciones no son los únicos que afectan. Existen otros parámetros como por ejemplo la temperatura, la edad, el estado físico, cultura, tiempo de viaje etc.

El método más común para evaluar el confort son las medias cuadráticas de las aceleraciones. Pese a ello, factores como los picos de aceleración, aceleración lateral en curva o sobreaceleraciones en dirección longitudinal, movimientos de lazo o cabeceo pueden afectar igualmente al confort. En vehículos basculantes fenómenos como la cinetosis o mareos cobran importancia.

Además de todos los parámetros físicos mensurables, también han de tenerse en consideración las respuestas del viajero. Esto puede hacerse mediante preguntas, medición de parámetros biológicos etc.

La evaluación del confort conforme a la ISO 2631 está descrita en la norma de aplicación ferroviaria EN12299.

De acuerdo con la ISO 2631, el cuerpo humano es sensible en rangos de 0.5-2 Hz en dirección horizontal y 4-10 Hz en dirección vertical. La siguiente tabla muestra niveles de confort en función de la aceleración media (lateral y vertical) según la ISO 2631.

A (m/s^2)	Confort
$a < 0,2$	Muy confortable
$0,2 \leq a < 0,3$	confortable
$0,3 \leq a < 0,4$	Medio confortable
$0,4 \leq a$	Poco confortable

Tabla 5.1: Medición de confort según aceleraciones

No obstante, existen otros índices para medir el confort como el N_{MV} o método estándar de la comodidad media que es un índice conforme a las aceleraciones en las 3 direcciones medidas en el suelo de la caja. A continuación se muestran los índices que evalúan el confort por este método.

N_{MV}	Confort
$N_{MV} < 1,5$	Muy confortable
$1,5 \leq N_{MV} < 2,5$	confortable
$2,5 \leq N_{MV} < 3,5$	Medio confortable
$3,5 \leq N_{MV} < 4,5$	Incómodo
$4,5 \leq N_{MV}$	Muy Incómodo

Tabla 5.2 Medición de confort según índice N_{MV}

Además de estos últimos indicadores existen más metodologías para evaluar la comodidad como pueden ser los índices de Sperling (ya en desuso).

Como ya se ha mencionado previamente, la máxima del presente trabajo se centra en reducir los movimientos y aceleraciones verticales para aumentar el confort desde la etapa primaria.

5.4 Métodos para reducir vibraciones en caja

A continuación se expondrán diferentes métodos para mitigar las vibraciones verticales en la caja, lo que aumentará el confort. Hay que tener presente que si la caja se ve sometida a vibraciones que sean las mismas que la frecuencia natural (o cercanas a ella) se excitarán los modos propios de vibración y resonará. Las vibraciones verticales pueden ser reducidas principalmente de dos formas. La primera es aumentar la rigidez de la caja y la segunda consiste en centrarse en la suspensión para reducir las vibraciones que llegan a la caja. Cuando los sistemas convencionales de amortiguación pasiva convencionales presentan limitaciones en el caso de vehículos con cajas muy flexibles, el siguiente paso lógico es estudiar tecnologías activas y/o semi-activas.

5.4.1 *Actuación en suspensión primaria*

La suspensión primaria es el primer punto de actuación ya que este es el más cercano al contacto rueda-carril. Esta suspensión está compuesta normalmente por un amortiguador y un muelle (o un sistema de muelles con diferente rigidez). El objetivo en este punto es asegurar desde un inicio un comportamiento estable en marcha y al mismo tiempo reducir las fuerzas en vía, el desgaste de rueda y carril y proporcionar buen comportamiento en curva. En función de la forma en que esté diseñado puede influir desde un inicio en el confort en la caja.

Las vibraciones que llegan a la caja pueden ser suavizadas reduciendo las vibraciones en el bogie o rodal. Esto se puede conseguir aumentando el coeficiente de amortiguamiento. No obstante, hacer esto puede aumentar las fuerzas dinámicas en el contacto rueda-carril o también, transmitir irregularidades con menor longitud de onda a la caja.

Para mejores resultados siempre puede tenerse en cuenta los sistemas de suspensión activos o semi-activos. En un estudio llevado a cabo en Japón [3]. Se colocaron actuadores semi-activos verticales en paralelo al muelle de la suspensión primaria para reducir el primer modo de vibración por flexión en caja. Además se analiza la influencia conjunta de los sistemas de suspensión primario y secundario semi-activos en caja y cómo afecta al confort del pasajero.

El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo de estudio la suspensión primaria vertical como principal punto de actuación colocando sistemas activos o semi-activos. Motivo por el cual se realiza un Benchmark para buscar qué tipo de sistemas existen en el mercado, ya sea dentro del sector ferroviario o no. Una vez vistas las posibilidades, se definirá cual sería el mejor para un futuro caso de estudio en función de los requerimientos que se necesiten.

5.4.2 *Actuación en suspensión secundaria*

La suspensión secundaria es el punto en el que se unen el bogie o rodal con la caja. Su propósito es aislar la caja de las oscilaciones transmitidas por la suspensión primaria, la rodadura y los bogies o rodales debidas a las irregularidades de la vía.

La configuración de este tipo de suspensión puede estar compuesta por diferentes tecnologías, aunque lo más común para trenes de pasajeros es la denominada suspensión neumática o balona de entre caja y bogie o rodal. Su objetivo principal es reducir las aceleraciones de la caja en y hacer que la frecuencia natural sea de 1Hz, esta frecuencia no crea incomodidad al ser humano. Las principales ventajas del uso de balonas con respecto a muelles convencionales son las siguientes.

- Independencia de la altura gracias al control de nivel.
- Baja altura.
- Buen aislante de sonido y vibraciones.
- Rigidez horizontal considerable.
- Aumenta la rigidez proporcionalmente a la carga del vehículo, manteniendo de esta manera la frecuencia natural.

Algunas de sus desventajas con respecto a muelles convencionales en la secundaria son coste y su alto LCC.

Además de la balona también hay amortiguadores verticales los cuales son generalmente hidráulicos. También existe una barra de torsión entre la caja y el bogie o rodal.

La forma más común para mejorar el confort es trabajar en la secundaria, por ello durante mucho tiempo se ha estudiado el control activo o semi-activo en este punto. Algunos de los métodos estudiados versan sobre el cambio de sección del agujero de la balona o incluso el uso de fluidos magnetoreológicos.

5.4.3 *Criterios de diseño para la caja*

Desde el punto de vista de confort es preferible incrementar la rigidez estructural de la caja para reducir el riesgo de oscilaciones resonantes. Algunos de los métodos que se pueden emplear son los siguientes.

- Hacer la caja lo más corta posible.
- Hacer la sección transversal de caja lo más grande posible. Siempre y cuando no haya problemas con el gálibo. Además, pueden surgir problemas debidos a los vientos laterales. Es importante destacar que al aumentar la sección, la semejanza con la pared

ha de mantenerse. Si se aumenta la sección sin aumentar el grosor de las paredes pueden surgir nuevos modos de vibración propios que sean perjudiciales.

- Emplear materiales más rígidos o que el diseño de la caja sea más rígido mediante el aumento de sección o inercia. Como contrapunto, normalmente estos últimos criterios son contradictorios con los requerimientos de pesos ligeros para disponer de un vehículo de alta capacidad.

Si la rigidez estructural disminuye la frecuencia natural para el primer modo de vibración también disminuirá. Esto resultará en un peor confort de marcha, ya que afecta al rango frecuencial de vibraciones acercándose a la zona en la cual el ser humano es sensible. Por ello, para reducir vibraciones por flexión es necesario tener un diseño lo más rígido posible.

5.4.4 *Otros métodos*

Además de los métodos anteriormente mencionados, existen formas para paliar la problemática de las vibraciones. Algunos de los métodos son los siguientes.

- Separar las masas de la caja dinámicamente para aumentar la frecuencia natural. La separación se realiza suspendiendo el componente o equipo de mayor masa a través de una etapa elástica (Ver Figura 5.9). Esto se suele hacer por ejemplo con los grupos de generadores de energía eléctrica. Además, esta separación de masas puede controlarse activamente para que sea más efectiva.

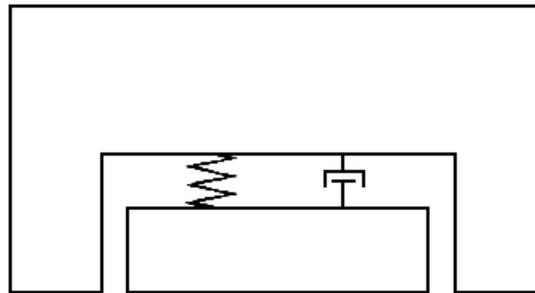


Figura 5.9: El principio de separación de masas aumenta la frecuencia natural de caja

- Uso de actuadores piezoeléctricos. Estos elementos se pueden usar para reducir los modos de vibración de la caja y así mejorar el confort de marcha (Ver Figura 5.10). Esto se consigue gracias las propiedades de estos materiales, que son capaces de convertir la energía mecánica en eléctrica y viceversa. Después esa energía eléctrica es disipada. La pérdida de energía tiene un efecto amortiguador.

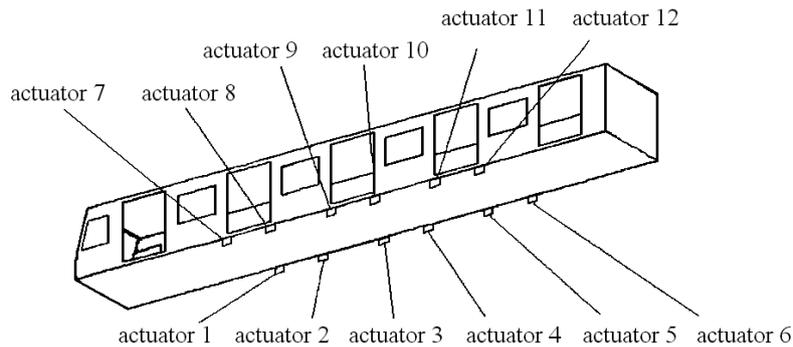


Figura 5.10: Montaje de actuadores piezoeléctricos para amortiguar vibraciones

- Uso de amortiguadores de masa activos [4]. Mediante la introducción de amortiguadores de masa activos también es posible aumentar la capacidad de amortiguado en la caja sin un aumento considerable de peso en la caja. Se trata de un sistema de absorción de vibraciones mediante el balanceo activo de un contrapeso colgante para reducir la amplitud de dichas vibraciones. Este método utiliza las fuerzas inerciales de reacción producidas por el movimiento de la caja. Se han realizado estudios donde se colocan estos elementos amortiguadores bajo los asientos en las zonas más influenciadas. El uso de estos sistemas produjo una reducción de las vibraciones de al menos 3 dB.

5.5 Suspensión activa y semi-activa para mejorar estabilidad y guiado

Uno de los mayores retos en el mundo del ferrocarril es sobreponerse a la contradicción existente entre estabilidad y guiado existente en un bogie con eje calado. La estabilidad de un vehículo circulando a alta velocidad en recta está íntimamente relacionada con la rigidez de la suspensión primaria, sobre todo en dirección longitudinal (a menudo también se coloca un amortiguador de lazo para aumentar la estabilidad). En cuanto al guiado del eje durante la circulación en curva es necesaria una relativa baja rigidez longitudinal de la suspensión primaria. Por ello, una buena configuración para estabilidad en recta no produce un buen comportamiento en cuanto a orientación del eje en curva. Esto provoca mayores fuerzas y desgaste en el carril.

Esta dualidad no ocurre solamente para la suspensión, de hecho sucede para muchos aspectos en el diseño de un tren, como puede ser el empuje de los ejes. Aquel que sea bueno para circular en recta no tendrá un buen comportamiento en curva. Es necesario encontrar un equilibrio.

La idea de la suspensión activa o semi-activa en la primaria se ha tomado en consideración durante mucho tiempo ya que permite cambiar la rigidez en función de los requerimientos del momento ofreciendo así un buen comportamiento para los dos escenarios contrapuestos.

Aunque a la hora de instalar este tipo de tecnologías siempre hay que tener presente la seguridad, y mucho más en un elemento como la suspensión primaria, que es el primer “punto de ataque” a la hora de mitigar las fuerzas que surgen de los carriles cuando se circula.

5.6 Suspensión activa y semi-activa para mejorar el confort

A diferencia del sistema de suspensión primaria, el sistema de suspensión secundaria está diseñado para principalmente ofrecer confort. No obstante, cada sistema de suspensión tiene su propia influencia en mayor o menor medida en cada aspecto, ya sea estabilidad, guiado o confort.

La inclusión de un sistema activo o semi-activo en este punto de la suspensión está pensada para ofrecer un mejor aislamiento que los sistemas convencionales pasivos ante las excitaciones que puedan acabar llegando del contacto rueda-carril al pasajero. Así pues, los principales objetivos de la suspensión secundaria activa y semi-activa son:

- Que exista un mejor confort para el pasajero comparado con los sistemas convencionales cuando las condiciones de trabajo son las mismas.
- Mantener un buen confort cuando se aumenta la velocidad operativa del tren
- Proporcionar un buen confort aun cuando las condiciones de vía no son buenas

La suspensión secundaria suele trabajar en tan solo dos direcciones. La dirección lateral está íntimamente relacionada con los movimientos de lazo. La dirección vertical tiene que ver con el cabeceo. Para el control lateral se emplean actuadores activos o semi-activos en función de la fuerza que se le induzca al sistema. Cuando se busca controlar la dirección vertical existe un sistema de control semi-activo que consiste en controlar la sección del agujero de pérdida de carga de la suspensión neumática, lo cual varía su amortiguamiento. Si se quisiera controlar activamente habría que introducir un actuador.

6 Conclusión y selección preliminar de tecnología

A la hora de decidir cuál es la mejor metodología para controlar la suspensión primaria hay una serie de consideraciones que se deben tener presentes, algunas de las cuales son:

- **Requerimientos:** Hay que tener en cuenta las solicitudes a las que se va a someter el sistema, es malo colocar un sistema que no cumpla con lo que se espera de él, pero igualmente malo es colocar algo que esté “sobredimensionado” para el trabajo que va a hacer. Esto aumentaría los costes en todos los ámbitos y aumentaría también el nivel de complejidad que en realidad se necesita.
- **Nivel de desarrollo de la tecnología actual:** El nivel de la tecnología actual es otro factor decisivo. Puede que exista algo que hipotéticamente sea perfecto para el uso que se espera de él, pero si las condiciones físicas reales, por ejemplo, hacen que el sistema no se pueda hacer realmente, igualmente es un sistema inválido.
- **Precio:** El precio siempre es un factor decisivo, a fin de cuentas si se obtiene una ganancia muy pequeña por un gran precio, el gasto no compensa.
- **Tiempo en que se debe finalizar la inclusión de la suspensión en el sistema global:** Pudiera también darse el caso de que lo que se necesita no esté inventado o en fase de desarrollo y necesite más tiempo para ser finalizado. Si el plazo que se impone para incluir el sistema en el conjunto global es de un año y la nueva suspensión estará desarrollada en tres años esa elección también es inválida.
- **Marcas que ya dispongan de tecnología ferroviaria o estén dispuestas a estudiar su tecnología para adaptarla al sector:** Esta es una limitación más además de las ya mencionadas. No todas las marcas disponen de la misma tecnología y, puede haber algunas que tengan un tipo de actuador u otro. Además está el hecho de que las cargas a las que se somete un tren de alta velocidad son de una naturaleza muy específica y puede haber que estudiar detenidamente cada caso. Por tanto, las marcas que ya trabajan dentro del sector ferroviario son las primeras a considerar y seguidamente comprobar si las marcas de otros sectores están dispuestas a desarrollar los estudios y prototipos necesarios para la inclusión de una suspensión inteligente en un tren.

Visto el estado del arte actual y el nivel de desarrollo que existe hoy día en suspensiones inteligentes, las únicas marcas que tienen desarrollos y están dispuestas a invertir en el sector ferroviario son prácticamente las propias marcas que ya se dedicaban previamente a dicho sector. Por lo que **las opciones a seguir son aquellas marcas japonesas que han realizado ya estudios y suministran este tipo de tecnologías a trenes japoneses.**

Dentro de las tecnologías que producen estos fabricantes, la tendencia actual y donde se han realizado más estudios es en la suspensión semi-activa.

Una vez decretado que lo más adecuado actualmente es una suspensión semi-activa quedaría por concretar el tipo de controlador que se emplea. Pese a haber muchos tipos de tecnología, los controladores con los que se han realizado más pruebas son el *Skyhook* y el LQG.

Los resultados de *Skyhook* pueden ser mejores que LQG y viceversa, eso depende del test y las condiciones de vía. No obstante, LQG necesita más acelerómetros y más coste computacional, por lo que es más complejo que el *Skyhook*.

Además de su menor complejidad técnica, el controlador tipo *Skyhook* destaca por su facilidad de regulación al depender de pocos factores y tener una relación de transmisibilidad baja. Esto ya se ha visto en el apartado 3.5.2

La Figura 6.1 muestra un esquema de cómo funciona un amortiguador semi-activo, donde se varía el caudal en función de si se comprime o tracciona el mecanismo con una válvula. Esta válvula puede endurecer o ablandar el comportamiento en función de la sollicitación presente.

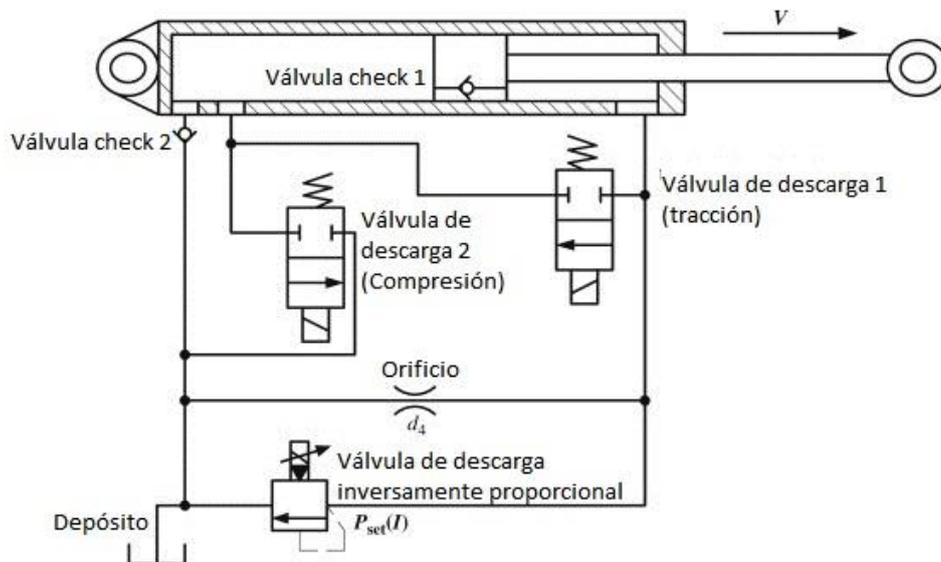


Figura 6.1: Esquema de funcionamiento de amortiguador semi-activo

Un aspecto positivo de este sistema es que si dejara de funcionar, la válvula de descarga del sistema pasaría a comportarse prácticamente como un sistema pasivo. Esto puede verse en la siguiente imagen (Figura 6.2), donde aparecen los comportamientos en distintas situaciones de

un sistema de estas características comparados con un sistema pasivo. Por tanto la filosofía Fail-Safe se cumple en un aparato de estas características. En la Figura 6.3 puede verse la variabilidad de fuerza de amortiguamiento en varias situaciones.

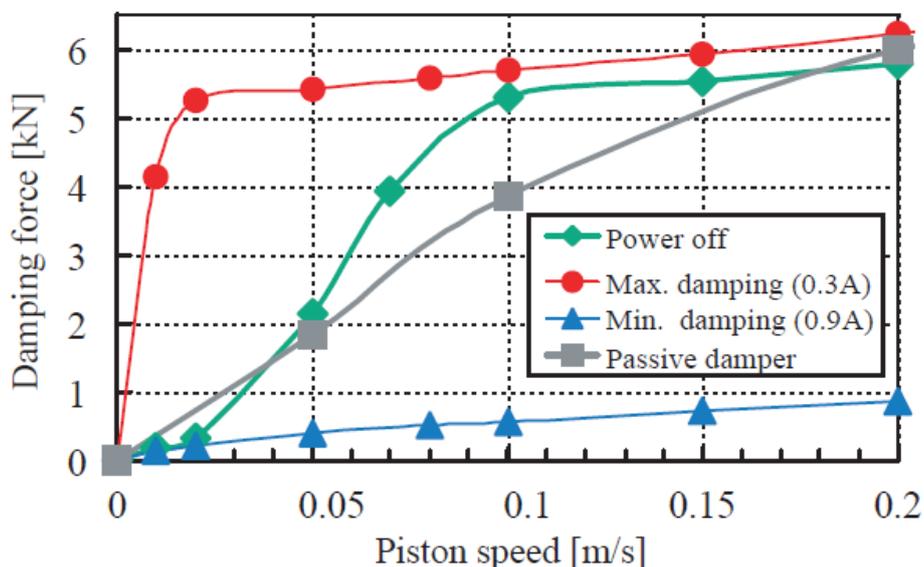


Figura 6.2: Comportamientos de amortiguador semi-activo Vs. Pasivo

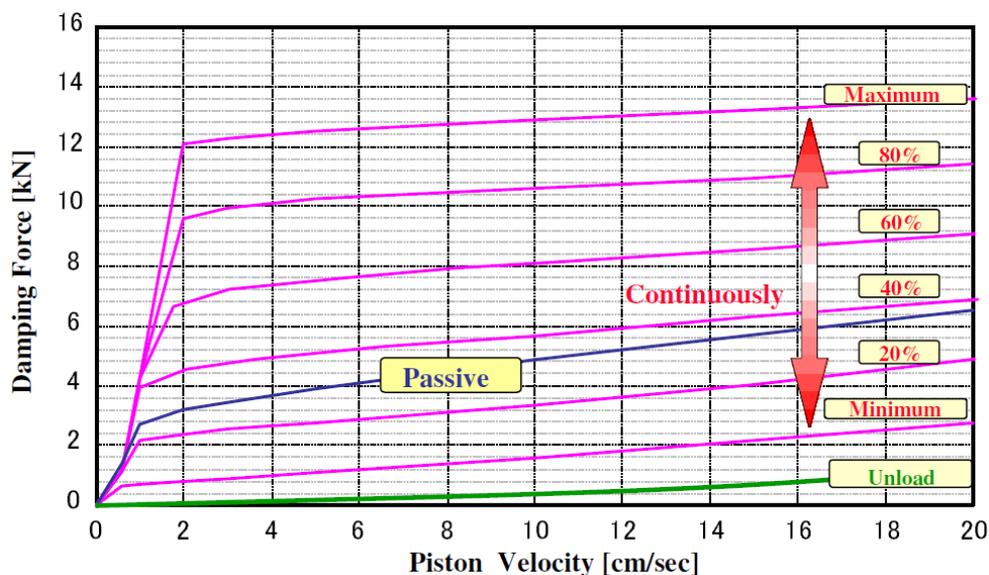


Figura 6.3: Rangos de variación de fuerza de amortiguado en suspensión semi-activa

Para un sistema magnetoreológico ocurriría algo parecido, ya que a grandes rasgos “endurece” el fluido dentro de un amortiguador pasivo, permitiendo así el cambio de coeficiente amortiguamiento. (No obstante, dentro del sector ferroviario, por ahora no se ha encontrado ningún fabricante que tenga este tipo de tecnología para la suspensión primaria).

En un sistema con control dependiente de la frecuencia, se puede modificar la capacidad del amortiguador en base a la excitación, lo que hace que el sistema se comporte de un modo u otro. (Esta puede ser otra opción a explorar además del *Skyhook*).

Finalmente, las siguientes figuras muestran un caso de estudio en el que se muestran las reducciones de vibraciones con diferentes tecnologías: Pasivo, *Skyhook* y LQG. Para este caso de estudio en concreto el *Skyhook* ofrece los mejores resultados (Aunque puede que en otras condiciones de vía el LQG ofrezca mayor reducción de vibraciones).

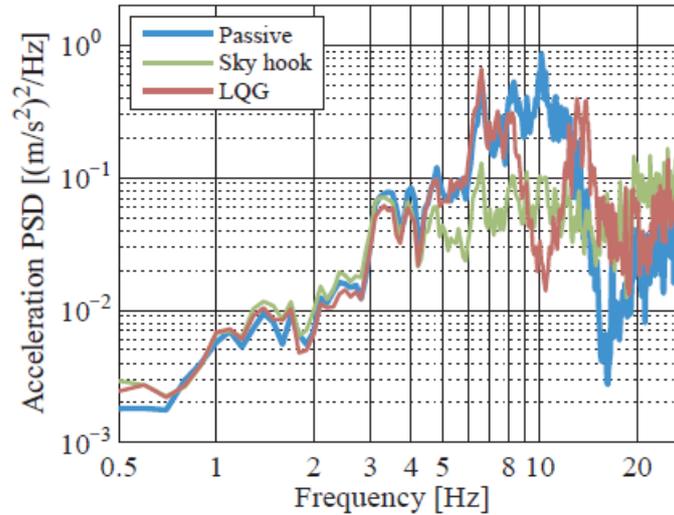


Figura 6.4: Reducción de vibraciones con distintos tipos de control en bogie trasero

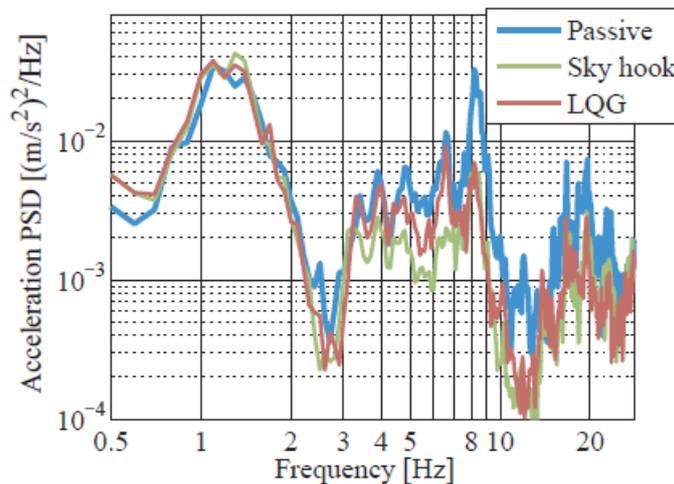


Figura 6.5: Reducción de vibraciones con distintos tipos de control en suelo de caja

Se aprecia una reducción notoria en la banda de 4 a 10 Hz, que es donde el ser humano es más sensible verticalmente de cara al confort (Según la norma UNE-EN 12299). Así pues, puede afirmarse que se mejora la comodidad del tren al aplicar un sistema de estas características.

La siguiente Tabla 6.1 ofrece una somera comparativa entre los sistemas activos y semi-activos.

	Nivel estudio		Control	Comportamiento FAIL-SAFE	Integrabilidad	Fuerza- Velocidad	Consumo Energético
	Primaria	Secundaria					
Semi-activa	medio	↔ alto	Múltiples estrategias	Hidráulico	Sencilla	Dependiente	medio- bajo
		↑ ↓ medio-alto		Magnetoreológico			
Activa	No consta	↔ alto	Múltiples estrategias	Hidráulico	Compleja	Independiente	alto
		↑ ↓ medio-alto					

Tabla 6.1: Principales comparativas suspensión activa Vs. Semi-activa

Como puede verse, cada tecnología posee unas ventajas sobre las otras. Comparando puntos como la integrabilidad, el consumo energético y muy importante, el nivel de estudio que existe en este tipo de tecnología. Puede concluirse que la tecnología más prometedora en un futuro próximo es la semi-activa, además, el consumo es menor y su instalación, si se diera el caso de colocarlo en material rodante ya existente, es más sencilla.

Por lo tanto, el sistema que mejor puede adaptarse a los requerimientos necesarios sería una suspensión semi-activa con control (en principio) *Skyhook*. Esto es así debido a que es el campo de mayor investigación (de hecho, algunas marcas ya están incluyendo esta tecnología en algunos trenes) y el que posee un controlador electrónico más sencillo, barato y sobre el cual más se ha estudiado. Explorar tecnologías dependientes de la frecuencia también puede ser interesante. Teniendo todo eso presente, se han buscado proveedores que dispongan de tecnologías inteligentes, no solo en el sector ferroviario, también se han explorado otras opciones como el sector defensa, minería o automoción.

6.1 Tecnologías activa y semi-activa en el mercado

6.1.1 Proveedores sector ferroviario

La primera posible fuente para proveedores que se ha de comprobar es la propia del sector ferroviario puesto que dichos fabricantes están naturalmente acostumbrados a trabajar con cargas como las que en un principio se necesitan. No obstante, no abundan fabricantes capaces de crear dispositivos que actúen directamente en la suspensión primaria. Lo más común es actuar en la secundaria.

Los principales fabricantes que pueden disponer de tecnologías activas y semi-activas son:

- **LIEBHERR**

Proveedor de sistemas de control hidráulico tales como sistemas de nivelación, sistemas de guiado lateral activo, sistemas de guiado de bogie, sistemas antilazo.

Su línea de productos abarca desde amortiguadores pasivos simples hasta complejos sistemas. Tienen presencia en trenes de alta velocidad, locomotoras, larga distancia, cercanías, metros, tranvías etc.

Poseen actuadores hidráulicos para el guiado/posicionado de cajas en curva.

Poseen un sistema de amortiguación semi-activa empleado en autobuses articulados.

- **KONI**

Proveedor de múltiples sistemas de amortiguación. Presentes en todo tipo de sectores.

Dentro del sector ferroviario existen 3 ramas de desarrollo: PERFORMANCE LINE, ENDURANCE LINE y TECHNOLOGY LINE. En la rama TECHNOLOGY existe la posibilidad de incorporar el sistema FSD (Frequency selective damper) para las series 05 y 06. Este sistema proporciona una fuerza de amortiguado variable en función de la frecuencia. Este cambio se realiza de manera mecánica, independientemente de cualquier control electrónico.

- **HITACHI**

Hitachi es una empresa japonesa que provee a múltiples sectores, principalmente al sector automoción, aun así, han desarrollado junto con el RTRI dispositivos para el sector ferroviario. Inicialmente poseían sistemas de amortiguación semi-activa lateral. Hoy día junto con el RTRI desarrollan sistemas para la mejora del confort con sistemas semi-activos en diferentes puntos de aplicación.

- **Suspensión secundaria:** Mediante una tobera variable controlada electrónicamente han podido cambiar las frecuencias propias de la balona neumática, lo que les da mejor capacidad de amortiguación a bajas frecuencias. También se han empleado sistemas hidráulicos semi-activos en la etapa secundaria con el fin de mejorar el confort.
- **Suspensión primaria:** Su principal desarrollo consiste en una suspensión hidráulica variable. Las principales formas de control de sus suspensiones en sus estudios han sido el control SKYHOOK y LQG. Una de las principales ventajas de este sistema es que ofrece capacidad de amortiguamiento incluso cuando existe un fallo electrónico.

- **KYB**

KYB es un proveedor nipón con presencia en múltiples sectores y con tecnologías de actuación diferentes. Para el sector ferroviario ha desarrollado principalmente dos tipos de tecnologías.

- **Amortiguación semi-activa:** El sistema mantiene el confort ya que es capaz de controlar la rigidez del actuador en todo momento. Reaccionan suavemente a los movimientos de balanceo a medida que éste se propaga por la composición y reaccionan contundentemente ante los balanceos producidos por la presión del aire o cualquier otro tipo de perturbación fuerte. Además de ello, el sistema transforma la energía del balanceo en energía eléctrica para poder operar el amortiguador sin una fuente adicional de alimentación.
- **Sistema activo multimodo (ASTRIC):** Este sistema reduce efectivamente las vibraciones en el bastidor del coche con actuadores eléctricos activos. Ofrece un confort de marcha notablemente mejor que el sistema previo. Además, la tecnología multimodo permite al actuador trabajar de manera pasiva, semi-activa o activa.

- **NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL**

Nippon es otro proveedor nipón con tecnologías activas electromecánicas para mejorar el confort lateral. Inicialmente apostó por la tecnología neumática para sus actuadores. Más adelante comprobaron que no se puede ejercer gran fuerza y que otros sistemas poseen una actuación más rápida. Además, estos sistemas tienen un gran gasto de aire, elemento que ya se necesita para muchas otras cosas del tren. Por este motivo se ha dedicado a desarrollar tecnología electromecánica. Suministra este tipo de actuadores a la serie E2, E5 y E6 de Shinkansen.

- **NAJICO**

Proveedor de múltiples subsistemas del tren. Se menciona que tienen un sistema semi-activo para amortiguar vibraciones. Su sistema emplea la energía de las propias vibraciones externas para controlar la amortiguación en vez de un control electrónico externo.

- **KAWASAKI**

Kawasaki es otro distribuidor de partes japonés. Poseen un amortiguador lateral secundario activo de tamaño compacto para mejorar el confort lateral, esto se consigue debido a que funciona mediante un actuador eléctrico. La reducción pasa de 70 kg (sistemas tradicionales) a

solo 32 kg. La mejora no ocurre tan solo en el peso, el consumo energético es menor, del orden de un 30% y reduce más los ruidos y vibraciones.

Además del amortiguador activo compacto también poseen un amortiguador semi-activo con tecnología magnetoreológica.

6.1.2 Candidatos sector defensa

El sector de defensa es un campo prometedor en el que encontrar posibles candidatos debido a que las tecnologías de suspensión activa y semi-activa están cobrando importancia en los últimos años. Además de ello, las cargas de actuación para las que están diseñados son elevadas debido a la propia naturaleza de los vehículos de este tipo. Otro factor que es beneficioso es que las condiciones para las que se diseñan este tipo de dispositivos son extremas, lo cual es ventajoso de cara a la fiabilidad del aparato.

Los proveedores que se han encontrado que puedan suministrar este tipo de tecnología son:

- **GENERAL KINETICS**

GK es un proveedor canadiense para vehículos del sector defensa tanto ligeros, como medios o pesados. Su tecnología semi-activa es propia e hidráulica. La fuerza de amortiguación variable se consigue gracias a una válvula hidráulica patentada controlada electrónicamente que cambia el tamaño del orificio de amortiguación en tiempo real. De este modo, el rango de amortiguación pasa de ser una línea a todo un área.

- **HENDRICKSON DEFENSE**

HD es un proveedor de tecnología de suspensión estadounidense. Dentro del ámbito activo posee un sistema de suspensión hidroneumático semi-activo propio que no requiere de aportación externa de energía. Una de sus principales diferenciaciones es lo que denominan CROSS-control, o lo que es lo mismo, la conexión cruzada de cada par de actuadores. Así se consigue un equilibrio en la carga y una gran estabilidad.

- **HORSTMAN**

Horstman es otro proveedor canadiense para sistemas de amortiguación en el sector defensa. Además de los sistemas de suspensión tradicional, Horstman también posee tecnología activa y semi-activa. Ellos han apostado por un sistema escalable, en el que sus amortiguadores pasivos pueden hacerse semi-activos añadiendo una válvula de control proporcional. Igualmente, su sistema semi-activo puede hacerse activo totalmente al añadir unos dispositivos electromecánicos a los amortiguadores, estos dispositivos son desarrollo propio de la marca, por lo que son totalmente compatibles.

- **LORD**

Lord es otro proveedor estadounidense de sistemas de amortiguación. Su principal nicho de estudio son los sistemas basados en fluido magnetoreológico, por lo que sus sistemas son semi-activos. Llevan años trabajando con este tipo de actuadores, de modo que su tecnología está basada en el control SKYHOOK, aunque puede tener pequeñas variaciones. Lord es suministrador para otro gran fabricante de suspensiones, BWI group, para quien suministran tecnología aplicable a su sistema Magneride, de la que se hablará más adelante dentro de los proveedores de automoción.

- **SUPASHOCK**

Tecnología activa para múltiples sectores además de defensa.

6.1.3 Candidatos sector minería

El sector de la minería posee grandes cargas a amortiguar, por lo que también puede ser un nicho en el que encontrar tecnología interesante. Nuevamente las tecnologías inteligentes están menos extendidas.

Proveedores que posean tecnologías inteligentes:

- **LIEBHERR** (Presente también en sector ferroviario)
- **SIMARD / WEBER HYDRAULIK**

Simard es un proveedor canadiense, esta vez en el sector de minería. La tecnología que ofrecen es del tipo semi-activo hidráulico. Su sistema DTS ofrece una distribución óptima del peso, estabilidad y tracción. El sistema DTS reemplaza los conjuntos de resortes, resortes neumáticos, amortiguadores y barras estabilizadoras por cilindros hidráulicos que además mantienen la altura del vehículo estable. El resultado es una suspensión cuyas características pueden variar en función de la demanda.

- **SUPASHOCK** (Tecnología activa, también presente en sector defensa)
- **H-E PARTS** (Tecnología activa y semi-activa)

6.1.4 Candidatos sector automoción

El control inteligente es algo que está cobrando gran peso en el sector de automoción hoy día y cada vez más. El problema de este sector es que el nivel de cargas que manejan es inferior al sector ferroviario. No obstante también se han buscado proveedores ya que no hay que olvidar que sus actuadores podrían ser escalables y adaptados al sector.

A continuación se enumeran algunos proveedores:

- **CLEARMOTION**

Clearmotion es un distribuidor estadounidense que compró una tecnología desarrollada por BOSE y hoy día la venden dentro del sector de automoción. Su tecnología es activa y electrohidráulica. En cada actuador se coloca lo que ellos denominan “Activálve”, controlada de manera independiente. Cada Activálvula tiene 3 partes principales, el “Gerotor”, un motor eléctrico BLDC y un controlador digital.

- **MONROE**

Monroe es otro distribuidor estadounidense para el sector de automoción. Tienen múltiples sistemas tanto activos como semi-activos, los cuales se comentan a continuación, su tecnología se basa en el uso de válvulas electrohidráulicas.

- **DRiV**: Esta tecnología proporciona una solución de suspensión digital electrónica que se adapta a la carretera empleando 16 curvas diferentes de amortiguamiento. Estas 16 curvas se obtienen a partir de la actuación conjunta de 4 válvulas solenoides. Al conmutar digitalmente estas 4 válvulas se obtiene un rendimiento similar al de soluciones de sistemas de válvulas de gran complejidad. (Sistema semi-activo)
- **DUAL MODE**: Mediante el accionamiento de un botón, se puede tener una conducción de alto confort o una conducción más deportiva. El sistema simplemente actúa en una válvula que cambia las propiedades del amortiguador. (Sistema semi-activo)
- **CVSAe**: (Continuously Variable Semi-Active Suspension) Suspensión semi-activa con variabilidad continua. Una válvula externa detecta las condiciones de conducción de manera que actúa sobre los amortiguadores para ofrecer una conducción cómoda y controlada.
- **CVSA2**: La nueva generación de las ya mencionadas suspensiones semi-activas con variabilidad continua. Cada actuador cuenta con dos válvulas electrohidráulicas que controlan los movimientos de rebote y compresión de manera independiente ofreciendo así mayor control y comodidad. (Sistema semi-activo)
- **CVSA2/KINETIC**: El sistema CVSA2/KINETIC ofrece un menor consumo energético. Su sistema de control de balanceo elimina la necesidad de barras antivuelco, lo que reduce el peso proporcionando un mejor rendimiento. (Sistema semi-activo)

- **ACOCAR**: es un sistema de suspensión totalmente activo, se controla mediante dos bombas hidráulicas que permiten controlar movimientos tales como balanceo y cabeceo.

- **HITACHI** (También presente en sector ferroviario)
- **KYB**

En el ámbito de automoción KYB tiene desarrollado un sistema dependiente de la frecuencia similar al de KONI denominado HARMOFREQ

- **HUSCO** (Tecnología semi-activa)
- **LORD** (Tecnología semi-activa magnetoreológica, presente también en defensa)
- **SHOWA**

La japonesa Showa tiene la denominada tecnología SFRD (Sensitive Frequency Response Damper), un mecanismo que utiliza medios mecánicos para ajustar automáticamente la fuerza de amortiguación en función de la frecuencia de entrada inducida por las distintas irregularidades de la carretera. Si bien logra la estabilidad de la dirección y el confort de marcha a alto nivel, también contribuye a la reducción del costo y el peso porque no se necesita un sistema controlado electrónicamente. Es un sistema semi-activo. Tecnología similar a la aplicable por KONI (FSD) en el sector ferroviario.

- **ZF-SACHS**

ZF-SACHS es un grupo alemán que dispone de una gama de amortiguadores activos hidráulicos con control electrónico continuo (CDC). Los amortiguadores CDC para turismos cuentan con una válvula de amortiguación proporcional controlada electrónicamente. Diferentes sensores monitorizan todas las variables, desde las condiciones de la calzada y la carga útil hasta las acciones del conductor. Dependiendo de la posición se permite un gran paso del flujo de aceite (blando) o un paso constreñido (duro) Una unidad de control regula entonces la fuerza amortiguadora con exactitud. Su tecnología se basa en Skyhook. Este tipo de actuadores son del tipo semi-activo.

Además de la tecnología de la que ya dispone, ZF está trabajando en el denominado Genshock, una suspensión totalmente activa que además genera electricidad a partir del movimiento del propio actuador.

- **BWI GROUP**

BWI group es una empresa china que se centra principalmente en tecnología relacionada con el magnetismo, aplica esos principios de diferentes maneras para poder variar las constantes de amortiguación de sus productos.

- **DUAL RIDE:** En este tipo de actuadores hay un control electromagnético que selecciona entre uno o dos pistones para el paso del aceite por el amortiguador. De esta forma existe variabilidad entre las posibles fuerzas de amortiguado. En uno de los modos no hay consumo eléctrico alguno.
 - **MAGNERIDE/MAGNETO-RHEOLOGICAL:** En este tipo de actuadores hay una bobina que genera un campo magnético variable que incide en el fluido del amortiguador, el cual se ve afectado por el magnetismo. Así, conforme más intensidad se aplique a la bobina, mayor dureza tendrá el amortiguador. Esta tecnología permite filtrar entre 2 y 22 Hz.
 - **AIR SUSPENSION:** El módulo de gestión de aire integrado (IAMM) junto con una unidad de suministro de aire proporciona una suspensión equivalente a la secundaria ferroviaria con balonas de aire pero en ámbito de automoción. Así se pueden compensar las alturas del vehículo en función de la carga o incluso mejorar el consumo de combustible ajustando la posición del morro en función de la velocidad.
- **THYSSENKRUPP / BILSTEIN**

La compañía alemana Thyssen Krupp/Bilstein ha desarrollado múltiples sistemas para un control variable de la fuerza de amortiguado. Los siguientes mencionados son del tipo semi-activo.

- **ADS (Adaptative Damping System):** Este sistema dispone de dos válvulas controladas electrónicamente dentro de un amortiguador mono tubo de gas. En tan solo 60 milisegundos se pueden cambiar las configuraciones de manera que existen 4 posibles ajustes. La estrategia de control es mediante el método Skyhook, así, en función de si se está en extensión o compresión se puede tener una configuración dura o blanda para cualquier situación. Las cuatro características (Extensión/Compresión) son: Blando/Blando, Blando/Duro, Duro/Blando, Duro/Duro.
- **DAMPTRONIC I/II:** Es un sistema de amortiguación regulado electrónicamente, en el que puede haber infinita variabilidad. Las válvulas de ajuste pueden montarse dentro del propio amortiguador (Damptronic I) o por fuera del mismo (Damptronic II). Los sensores detectan la situación de conducción y el estado del vehículo en todo momento. La unidad de control registra toda la información y a continuación ajusta la fuerza de amortiguamiento para cada dispositivo de manera individual.

- **DAMPTRONIC SELECT:** Con el sistema Dampronic Select de dos estados se cierra la brecha entre los sistemas pasivos y los sistemas de infinita variabilidad. Se puede alternar entre dos configuraciones para los amortiguadores, dura y blanda de forma manual.
- **DAMPTRONIC SKY:** El sistema Dampronic SKY ofrece un compromiso especialmente bueno entre confort y agilidad. Cada actuador ajusta la fuerza de amortiguado mediante dos válvulas con infinita variabilidad. Una controla la fase de extensión y la otra la de compresión.

Además de los 4 tipos de sistemas previamente mencionados, Bilstein también posee un sistema de suspensión activo neumático.

- **BILSTEIN B4:** Esta tecnología dispone de diferentes módulos para regular el comportamiento, un módulo pasivo, un módulo que cambia la dureza en función de los modos sport y confort y por último un módulo de suspensión activa basado en la filosofía Skyhook.

7 Aportaciones

El dotar a un tren con una tecnología más avanzada como es una suspensión activa/semi-activa conlleva una serie de mejoras, a continuación se citan los puntos más notorios donde se aumentarían las prestaciones.

- Mejoría en el confort de viaje al reducir las vibraciones transmitidas a todo el tren, esto también mejora el comportamiento a fatiga.
- Reducción del desgaste de rueda y vía al colocar sistemas que ofrecen un comportamiento más suave.
- Menores niveles de ruido y vibraciones generados por el tren.
- Al colocar una suspensión activa/semi-activa se implementan en el tren una serie de acelerómetros que, junto con la odometría, permiten monitorizar el estado de la vía. Al recibir mayor número de datos es más sencillo mantener la vía en base a las condiciones de la misma.
- Puesto que esta implementación es algo bastante novedoso y es un campo donde otros sectores tienen más experiencia, este desarrollo permitiría usar en el ferrocarril desarrollos de otras industrias.
- Este TFG también aporta un listado de empresas especializadas en suspensión activa y semi-activa.
- Se aporta también la posibilidad de implementar en una rodadura Talgo sistemas activos y semi-activos en función de la frecuencia de excitación de la vía, el tamaño disponible dentro del rodal y de las fuerzas requeridas para ofrecer un amortiguamiento óptimo en todo momento.
- Finalmente habría que mencionar que, al colocar sistemas de monitorización como acelerómetros, puede hacerse un sistema de “vigilancia” interna que prevenga a una flota de trenes frente a una vía muy degradada en algún punto en concreto. Esto sería de vital importancia a la hora de operar trenes autónomos.

8 Trabajos futuros

En el presente trabajo de fin de máster se ha estudiado la inclusión de una sistema de suspensión activo en la etapa primaria. No obstante, hay más zonas donde se podría incluir tecnología activa para lograr un tren con mayor confort, por tanto quedaría pendiente la realización de los siguientes estudios:

- Estudios para la inclusión de amortiguación inteligente en la etapa secundaria.
- Comparativa de comportamientos donde se valoren dos sistemas de suspensión secundaria, uno con balona neumática tradicional y otro con balona con tobera variable para cambiar el coeficiente de amortiguamiento.
- Estudio en el que se compare la reducción de vibraciones en caja al incluir sistemas activos en las etapas primaria y secundaria conjuntamente.
- Inclusión de tecnología de amortiguación inteligente en dirección lateral en la etapa secundaria para mejorar aún más el confort.
- Inclusión de amortiguadores inteligentes entre las uniones longitudinales del tren. Permitiendo así que sea más “flexible” en curva y “rígido” en recta. Esto daría un comportamiento dinámico mejor en todos los escenarios, pudiendo hacer trenes más rápidos.
- Estudios en donde las uniones verticales o laterales entre coches posean amortiguación activa o semi-activa para homogeneizar el comportamiento global del tren. De este modo una perturbación en un coche se transmite menos al coche posterior. Una serie de uniones activas tendrían gran potencial para mejorar movimientos como: lazo, cabeceo sacudida y serpenteo

9 Bibliografía

- [1] Anneli Orvnäs: *Methods for Reducing Vertical Carbody Vibrations of a Rail Vehicle*, Report in Railway Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2010.
- [2] UNE, EN 12299:2010: *Aplicaciones ferroviarias – Comodidad de viaje para los pasajeros – Medida y evaluación*, Abril 2010.
- [3] Sugahara, Y.; Takigami, T. and Koganei, R.: *Suppression of Vertical Bending Vibration in Railway Car Bodies by Primary Suspension Damping Control (Results of Running Tests Using Shinkansen Vehicles)*, Proceedings of the International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD'09), Stockholm, Sweden, August 2009.
- [4] Yuki AKIYAMA; Takahiro TOMIOKA; Tadao TAKIGAMI: *Development of Active Mass Dampers for Reducing Multi-modal Flexural Vibrations of Carbody*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute Vol. 55, February 2014
- [5] Alstom Transport Technologies SAS: *Method for optimizing passenger comfort in a railway vehicle*; Frédéric Hallonet; United States Patent and Trademark Office US20170225697A1; 8 de octubre, 2017.
- [6] José Antonio Guerrero Fernández (2017): *Ingeniería de vías férreas*.
- [7] Anneli Orvnäs: *Active Secondary Suspension in Trains*, A Literature Survey of Concepts and Previous Work, Gröna Tåget, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2011.
- [8] Brian A. Reichert: *Application of Magnetorheological Dampers for Vehicle Seat Suspensions*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, EEUU, Diciembre 1997.
- [9] Hazlina Md Yusof: *Technologies and control strategies for active railway suspension actuators*, Doctoral Thesis, Loughborough University, Loughborough, October, 2012.
- [10] R. M. Goodall and T. X. Mei, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Editado por Simon Iwnicki. Editorial Taylor & Francis, Boca Raton, Florida 2006.
- [11] Jorge Hurel, Anthony Mandow, Alfonso García, *Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión*, Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI), Abril 2013.

- [12] Osamu Goto, *Development of Active Suspension System with Electromechanical Actuators for Railway Vehicle*, Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report no. 105, Osaka, Diciembre, 2013.
- [13] Jorge Hurel Ezeta, *Modelado analítico y control inteligente de un sistema de suspensión activa para un cuarto de vehículo*, Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, Julio 2013
- [14] Alireza Qazizadeh, *On active suspension in rail vehicles* Tesis doctoral, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2017
- [15] Norbert Hohenbichler, Klaus Six, Dirk Abel, *The benefit of skyhook control in high speed railway vehicles* Institute of Automatic Control (IRT) Aachen University (2006)
- [16] Yoshiyuki Maruyama, Koichiro Ishihara, Toshiaki Matsui, Satoshi Koizumi, *Development of an active suspension system for railway vehicles*. The Sumitomo Research n°59 (1997)

